ENCYCLOPÉDIE CHIMIQUE

TOME V

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

PARIS. — IMPRIMERIE C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ENCYCLOPÉDIE CHIMIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DE

M. FREMY

Membre de l'Institut, professeur à l'École polytechnique, directeur du Muséum
Membre du Conseil supérieur de l'instruction publique

PAR UNE RÉUNION

D'ANCIENS ÉLÈVES DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DE PROFESSEURS ET D'INDUSTRIELS

ET NOTAMMENT DE

MM. **ARSON** et **AUDOUIN**, ing. en chef des travaux chim. à la Compagnie parisienne du gaz
H. BECQUEREL, répétiteur à l'École polytechnique; **BERTHELOT**, sénateur, membre de l'Institut
BOUILHET, ing. dir. de la maison Christofle; M. **BOURGEOIS**, répétiteur à l'École polytechnique
BRESSON, ancien directeur des mines et usines de la Société autrichienne des chemins de fer de l'État
BOURGOIN, professeur à l'École de pharmacie; **BOUTAN**, ingénieur des mines
CAMUS, directeur de la Compagnie du gaz; **AD. CARNOT**, directeur des études de l'École des mines;
CHARPENTIER (Paul), ingénieur-chimiste expert, essayeur à la Monnaie
CHASTAING, pharmacien en chef de la Pitié; **CLÈVE**, prof. à l'Université d'Upsal; **CUMENGE**, ingén. en chef des mines
CURIE (J.), maître de conférences à la Faculté des sciences de Montpellier; **DEBIZE**, ingénieur en chef des manuf. de l'État
DEBRAY, membre de l'Institut; **DECAUX**, directeur des teintures des manuf. de l'État
DEHÉRAIN, membre de l'Institut, professeur au Muséum
DITTE, professeur à la Faculté des sciences de Caen; **DUBREUIL**, président de la chambre de commerce à Limoges
DUCLAUX, prof. à l'Instit. agronom.; **DUPRÉ**, s.-dir. du labor. municipal; **DUQUESNAY**, ing. des manuf. de l'État
EUVERTE, directeur des forges de Terre-Noire; **DE FORCRAND**, docteur ès sciences; **FUCHS**, ing. en chef des Mines
GARNIER, professeur à la Faculté de médecine de Nancy
GAUDIN, ancien élève de l'École polytechnique, prof. de chimie; **GIRARD**, directeur du laboratoire municipal
L. GODEFROY, professeur à l'École libre des hautes-études; **L. GRUNER**, inspecteur général des mines
Ch.-Er. GUIGNET, ancien élève et répétiteur à l'École polytechnique, professeur de chimie
GUNTZ, maître de confér. à la Fac. des sciences de Nancy; **HENRIVAUX**, direc. de la manufact. des glaces de Saint-Gobain
JOANNIS, maître de conférences à la Faculté des sciences de Bordeaux; **JOLY**, maître de conférences à la Sorbonne
JOULIE, pharmacien en chef de l'hospice Dubois; **JUNGFLEISCH**, professeur à l'École de pharmacie
KOLB, administrateur de la Société des manufactures des produits chimiques du Nord
LEIDIÉ, pharm. en chef de l'hôpital Necker; **LEMOINE**, ing. en ch. des ponts et chaussées, exam. à l'École polytechnique
LODIN, ing. des mines; **MALLARD**, prof. à l'École des mines; **MARGOTTET**, prof. à la Faculté des sciences de Dijon
MARGUERITTE, prés. du conseil d'admin. de la compagnie paris. du gaz
MATHEY, dir. des houillères de Blanzy; **MEUNIER (STANISLAS)**, aide-natur. au Muséum **MOISSAN**, agrégé à l'Éc. de pharm.
MOUTIER, examinateur de sortie à l'École polytechnique
MUNTZ, professeur, directeur des laboratoires à l'Institut agronomique; **NIVOIT**, profess. à l'École des ponts et chaussées.
ODENT, anc. élève de l'École polytechnique; **OGIER**, dir. du laboratoire de toxicologie à la préfecture de police
PABST, chimiste principal au laboratoire municipal; **PARMENTIER**, profes. à la Faculté des sciences de Montpellier
PÉCHINEY, directeur des usines de produits chim. du midi; **PERSOZ** fils, directeur de la condition des soies
POMMIER, industriel; **PORTES**, pharm. en chef de l'hôpital de Lourcine; **PRUNIER**, prof. à l'École de pharmacie
RIBAN, directeur du laboratoire de la Sorbonne; **ROSWAG**, ingénieur civil des Mines
ROUSSEAU, s.-dir. du laboratoire de chimie de la Sorbonne; **SABATIER**, prof. à la Faculté des sciences de Toulouse
SARRAU, professeur à l'École polytechnique; **SCHLAGDENHAUFFEN**, dir. de l'École de pharmacie de Nancy
SCHLŒSING, prof. au Conservatoire des arts et métiers; **SOREL**, anc. ingén. des manuf. de l'État
TERREIL, aide-naturaliste au Muséum; **TERQUEM**, professeur à la Faculté de Lille
URBAIN, répétiteur à l'École centrale des arts et manufactures; **VERNEUIL**, professeur de chimie
VIEILLE, ing. des poudres et salpêtres; **VILLIERS**, agrégé à l'École de pharm.; **VINCENT**, prof. à l'École centrale
VIOLLE, prof. à la Faculté des sciences de Lyon; **WELDON**, membre de la Société royale de Londres
WICKERSHEIMER, ingénieur en chef des mines, etc.

TOME V. — APPLICATIONS DE CHIMIE INORGANIQUE
2e SECTION. — 2e PARTIE

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Par M. WICKERSHEIMER
Ingénieur en chef des Mines.

PARIS.
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR,
LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES,
49, Quai des Augustins, 49.

1890



L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Par M. WICKERSHEIMER

Ingénieur en chef des mines.

ÉTAT ACTUEL

DE LA FABRICATION DE L'ALUMINIUM

ET DE SES ALLIAGES

Parmi les produits métallurgiques figurant à l'Exposition universelle de 1889, les plus remarquables peut-être, malgré leur faible masse, sont l'aluminium métallique et ses alliages.

C'est, en effet, un fait nouveau que cette apparition de l'aluminium comme métal industriel prenant place, par ses applications directes ou par celles de ses dérivés, à côté du nickel dont les applications industrielles, limitées il y a quelques années à cause de son prix, se sont considérablement étendues depuis qu'on a pu exploiter des gisements donnant les minéraux de ce métal avec abondance.

Il n'en est pas tout à fait de même de l'aluminium, le plus répandu des métaux dans la nature, mais dont les procédés de fabrication ne permettaient pas jusqu'ici de l'obtenir en quantité et à des prix tels que l'industrie pût s'en emparer, du moins d'une façon courante.

M. Rivot, dans son *Traité de Docimasie*, s'exprimait ainsi :

« L'aluminium métallique est beaucoup plus connu que les métaux alcalins terreux ; on en fabrique maintenant une certaine quantité dans diverses usines, par des méthodes fort analogues à celles qu'on suit dans les laboratoires pour

les préparations en petit. Le prix du métal est encore fort élevé, ce qui empêche de l'employer à un certain nombre d'usages auxquels il serait propre, d'après ses propriétés remarquables.

« L'aluminium livré par les fabriques est rarement pur; il contient toujours de faibles proportions de divers corps, dont il est difficile de déterminer exactement la nature et qui influent notamment sur ses qualités industrielles.....

« Plusieurs alliages de l'aluminium possèdent des propriétés remarquables qui leur assigneront des applications industrielles importantes aussitôt qu'on sera parvenu à fabriquer le métal à peu près pur à un prix peu élevé, et par des procédés réellement métallurgiques. »

Les désidérata de M. Rivot sont aujourd'hui réalisés. On est parvenu à fabriquer l'aluminium par des procédés réellement métallurgiques qui seront décrits plus loin et à un état de pureté presque complet, puisqu'il est livré en première fusion à une teneur en Al. égale à 97, 98 et même à 99,5 p. 100. Par des fusions successives (une ou deux suffisent généralement), on est arrivé à le débarrasser presque complètement de la silice et, dans certains cas, des oxydes ferreux qu'il contient.

Propriétés physiques de l'aluminium métallique.

L'aluminium est un métal d'un blanc un peu mat, légèrement bleuté et susceptible d'un beau poli à l'égal du nickel et de l'argent. Le bleuté augmente avec la teneur en silice.

En juxtaposant de l'Al. et de l'argent, les différences de teintes sont saisissantes : l'argent paraît jaunâtre à côté.

On donne à l'Al. un bel aspect de matité en le trempant d'abord dans de la soude caustique, puis dans l'acide nitrique. Sous cet aspect il ressemble considérablement à l'argent mat.

La densité est, d'après H. Sainte-Claire Deville :

Al. fondu. . . .	2,56	
Al. laminé . . .	2,67	
c'est-à-dire qu'elle est les	30,55	p. 100 de celle du fer fondu.
—	28,7	p. 100 de celle du cuivre fondu.
—	24,38	p. 100 de celle de l'argent fondu.

Cette légèreté peut être précieuse dans une foule d'applications industrielles et domestiques.

La légèreté de l'Al. est évidemment une des qualités les plus précieuses de ce métal. Ainsi, à volume égal, il est 1.242 fois moins cher que l'or, 554 fois que le platine et 33 fois que l'argent. Il est même un peu moins cher que le nickel, et ce prix ira encore en décroissant pendant longtemps. Le manganèse atteint déjà presque le même prix à volume égal.

Le point de fusion de l'Al. est d'environ 600 degrés; c'est du moins le nombre donné par l'*Annuaire du bureau des longitudes*, mais comme susceptible de correction. D'autres auteurs donnent 700 degrés.

Il paraît que l'Al. pur fond à un degré un peu inférieur, tandis que l'acier

fond entre 13 et 1.400 degrés, l'argent à 945 degrés, le cuivre à 1.054 degrés. Cependant il faut un assez long temps pour liquéfier l'Al., à cause de sa grande chaleur spécifique (0,202) et sa grande chaleur latente de fusion. C'est pour la même raison que, fondu, il lui faut un long temps pour revenir à l'état solide. La conductibilité est de 34,35 à 0 degré, et de 36,19 à 100 degrés (Lorenz); elle est à peu près double de celle du fer et moitié de celle du cuivre.

Cette fusibilité facilite considérablement l'emploi de ce métal dans l'industrie, et notamment dans la fabrication d'objets d'art remplaçant leurs similaires en argent d'un prix considérablement plus élevé.

L'Al. cristallise en octaèdres ou en cubes. La surface des barres fondues, surtout lorsque le refroidissement est rapide, est recouverte d'aiguilles cristallines qui augmentent avec la teneur en fer.

La cassure varie avec la nature du travail dont le métal a été l'objet. Laminé ou étiré, il a une cassure fibreuse ou soyeuse quelquefois à grain très fin. Fondu, il présente une cassure moins régulière et souvent à gros grains.

L'Al. de bonne qualité s'entame au ciseau sans déchirure.

Au-dessous de 98 p. 100 de pureté, le métal est aigre, d'un grain grossier et contient souvent des lamelles de silicium. Cependant ce métalloïde influe moins sur l'aigreur que le fer ou le cuivre.

L'Al. fondu a une résistance à la rupture de 10 à 12 kilogrammes, ce qui le met au niveau de la fonte. Mais laminé ou forgé, il atteint presque la résistance du bronze à canons et dépasse celle du cuivre laminé à chaud, ainsi que de l'étain et du zinc.

Laminé à froid, il résiste à 27 kilogrammes.

Même à 360 degrés, on peut encore le plier sans le rompre.

L'Al. se lamine facilement; j'en ai vu des rubans de *clinquant* d'une très grande longueur et même de la véritable battiture de $\frac{1}{160}$ de millimètre, pouvant remplacer la battiture d'argent pour l'argenture, genre d'emploi que l'inaltérabilité de ce métal à l'air rend très facile et très avantageuse.

L'Al. pur est également très ductible et on en a pu voir exposés de nombreux rouleaux de fil de toute épaisseur jusqu'à la ténuité des fils d'argent les plus fins. Le fil d'Al. a un aspect particulièrement brillant qui, sauf le poids, le ferait facilement confondre avec l'argent.

D'après M. Kiliani, un fil de $2^{mm},5$ recuit, a une résistance de 25 kilogrammes. M. le professeur Bauschinger a fait l'essai d'Al. n° 1 de Neuhausen fondu qui, après compression et forgeage, a atteint $26^{k},7$ de résistance avec uns striction de $\frac{12,9}{1}$ et 2,7 p. 100 d'allongement. Recuit, ce même fragment n'avait plus qu'une résistance de 14 kilogrammes, mais avec un allongement de 23,3 p. 100. Puis étiré à nouveau jusqu'à la striction de $\frac{2}{1}$ il avait repris une résistance de $19^{kg},5$.

Les expériences de M. Le Chatelier ont établi la différence de résistance avec la température. Nous ne connaissons pas la composition chimique de l'échantillon choisi; quoiqu'il en soit, les résultats ont été les suivants :

Température	15°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	400°	460°
Résistance	18k,7	15,2	13	10,08	7,68	5,75	3,84	2,4	1,6

L'Al. se laisse facilement estamper et j'en ai vu de petits objets dont les contours sont extrêmement nets et les détails très fins.

On en fait aussi de très jolies médailles. C'est pourquoi on a pensé l'employer comme monnaie divisionnaire. Des pièces qu'on a frappées à la Monnaie sont très jolies d'aspect, mais je considère que leur excès de légèreté les fera rejeter : on ne sent rien dans la main, et il est nécessaire pour ne pas perdre l'argent qu'on tient à la main, qu'on en sente quelque peu le poids.

Il est très dilatable, presque le double de l'acier et un peu plus que l'argent.

Sa résistance en ohm légal d'une longueur de 10 mètres et de 1 millimètre de section carrée est de :

	0,2889
Celle de l'argent recuit	0,1492
— du platine	0,8982
— du fer	0,9638

Ceci explique la difficulté qu'il y a à produire la soudure électrique de l'aluminium.

J'ai néanmoins remarqué dans une vitrine de l'Exposition universelle de « Thomson international Welding C° », section américaine, parmi les métaux et alliages soudés électriquement, un barreau d'Al. soudé par ce procédé (1).

J'ai examiné dans la section anglaise (galerie des machines) le procédé de soudure par le courant électrique produit par dynamos ; le représentant de l'exposant m'a déclaré que l'auto-soudure électrique de l'Al. ne réussissait pas facilement et exigeait un certain tour de main.

Il se forge également à froid et à chaud, lorsque les impuretés ne dépassent pas 2 p. 100, et on fait déjà beaucoup de clefs de ce métal forgées à froid ou à une température très basse. J'en possède depuis des mois qui n'ont pas subi d'altération.

Un fait très remarquable c'est la résistance spécifique de l'Al. Je déduis d'un graphique de M. Kiliani le tableau suivant dont les nombres sont des coefficients proportionnels à la rupture des prismes métalliques sous leur propre poids.

Aluminium	10 000
Bronze Al. = 10 p. 100, fondu	8.500
Laiton, Al. = 3,3 p. 100, fondu	7 800
Acier fondu	7 200
Fer forgé	4.500
Métal Delta	4.500
Bronze phosphoreux (0,38 p. 100)	3.600
Bronze de canons ; étain, 8 p. 100	3 300
Laiton ordinaire laminé	2.600
Cuivre laminé	2.400
Fonte	1.800
Étain	1.100

(1) La compagnie Thomson a deux sièges, l'un en Amérique « Fiske building, Boston, Mass, U. S. A. » et l'autre en Angleterre « 82, New-Bound St. Londres w. »

Le tableau suivant correspond à des charges devant lesquelles le poids propre est négligeable:

MÉTAL	POIDS spécifique.	PRIX du kilog.	RÉSISTANCE par millimètre carré.	SECTION correspondant à une résistance de 100 kilog	RAPPORT du poids pour une résistance égale.	RAPPORT DES PRIX	
						à égalité de résistance.	à volume égal.
Al. n° 1, forgé ou laminé. .	2,68	25,00	27	3,70	0,84	10,98	6,95
Bronze Al. 10 p. 100. . . .	7,65	3,26	65	1,54	1,00	1,70	2,59
Laiton Al. = 3,3 p. 100 . .	8,33	1,76	65	1,54	1,09	1,00	1,52
Laiton Al. = 1 p. 100 . . .	8,35	1,33	40	2,5	1,78	1,23	1,15
Laiton ordinaire laminé Zn = 33 p. 100	8,38	1,15	22	4,55	3,24	1,95	1,00
Cuivre laminé	8,90	1,40	23	4,55	3,44	2,51	1,29
Fer forgé	7,82	0,225	35	2,86	1,89	0,22	0,18
Acier fondu.	7,71	0,35	55	1,82	1,19	0,217	0,28

On déduit immédiatement de là que l'Al. ne peut avoir la prétention, même en baissant considérablement de prix, de remplacer les autres métaux usités dans les constructions métalliques. Nous entrerons d'ailleurs, dans des explications plus détaillées en étudiant les alliages de ce métal.

L'Al. a une sonorité remarquable : il possède, d'ailleurs, deux sons fondamentaux, l'un longitudinal, l'autre transversal. J'ai constaté que le son transversal est assez difficile à percevoir.

Propriétés chimiques de l'aluminium.

L'Al. se dissout facilement dans l'acide chlorhydrique et les alcalis caustiques. Ces propriétés ont leur importance dans l'argenture et la dorure galvaniques. Il résiste fortement aux acides nitrique et sulfurique ainsi qu'aux acides organiques.

L'Al. est plus inaltérable à l'air sec ou humide que tous les métaux, l'or et le platine exceptés.

Fondu à l'air libre il ne se couvre que d'une pellicule insignifiante d'oxyde qui protège le métal intérieur. Ce n'est qu'au rouge blanc que l'oxydation est sensible. Même au rouge sombre il n'est pas attaqué par le nitre. A cette température, il ne décompose même pas les oxydes métalliques tels que ceux de fer, cuivre, manganèse et zinc. Lorsque le bronze d'Al. (à 10 p. 100) pulvérulent est chauffé au rouge, c'est le cuivre qui s'oxyde le premier. On peut même affiner l'Al. impur avec du plomb.

Mais au rouge vif l'Al. réduit les autres oxydes et cette propriété est suscep-

tible de nombreuses applications industrielles ainsi qu'on le verra plus loin; et, sous ce rapport, il y a de grands avantages sur d'autres corps réducteurs, tels que le silicium, le manganèse, le phosphore, le magnésium et le sodium.

1° Parce que l'oxyde Al^2O^3 une fois formé ne se réduit plus, comme les autres métaux;

2° Parce qu'il ne se dissout pas dans les autres métaux et par conséquent ne les rend ni aigres ni pâteux;

3° Parce qu'un excès d'Al. ne communique pas aux métaux des propriétés aussi fâcheuses que les autres corps réducteurs cités.

Si l'Al. est pur, la vapeur d'eau l'attaque à peine au rouge.

Il en est de même de l'eau de mer.

L'acide surfhydrique, qui existe toujours en certaine quantité dans les appartements et qui noircit l'argent n'attaque pas l'Al.

Nous avons vu que les alcalis attaquent l'Al., en l'oxydant; il en est de même des carbonates et autres fondants tels que le sulfate de soude, le borax et l'acide silicique. Le bore et le silicium en pénétrant dans l'Al. le rendent aigre et cassant. D'autres fondants tels que la cryolite l'oxydent peu, le sel marin pas du tout.

Il convient de fondre l'Al. sans l'adjonction d'aucun fondant.

Par la fusion avec des silicates on peut former des alliages d'Al. contenant jusqu'à 70 p. 100 de silicium, 2 pour 100 de *Si.* lui donnent déjà une teinte grise; au delà il devient aigre et ne se forge plus guère. Une partie du *Si.* est combinée chimiquement et, au moment de la dissolution du métal se dégage à l'état d'hydrure de silicium; une autre partie reste à l'état de silice. Cependant M. Vincelius, chimiste de l'usine Froges, prétend qu'il reste du silicium métallique après l'attaque par l'acide chlorhydrique.

Nous avons relevé à l'usine de Neuhausen la composition suivante des qualités marchandes d'Al.

N° 0 Al = 99,90,	Si = 0,06,	Fe = 0,04,
N° I Al = 99,14 à 99,61,	Si = 0,18 à 0,58,	Fe = 0,11 à 0,34,
N° II A.l. = 92,84 à 97,65,	Si = 0,94 à 3,82,	Fe = 1,37 à 3,34.

La qualité n° 2 est réservée pour les alliages bronze et laitons, ou par le raffinage du fer, du cuivre et de leurs alliages.

TRAVAIL DE L'ALUMINIUM

La mollesse de ce métal exige certaines précautions pour le travailler aux outils. Ainsi, j'ai vu à Neuhausen un gros bloc d'Al. (destiné à l'exposition de Berlin, je crois), dont la surface a été fortement déchirée par la raboteuse. Il faut donc se contenter d'enlever des copeaux très fins à la fois pour obtenir une surface unie.

Lorsqu'on le lime en croix, le trait de lime disparaît vite; mais il se conserve bien lorsqu'il est dans un seul sens. Mais pour rafraîchir la lime, qui

s'encrasse facilement, il est nécessaire de la plonger dans une dissolution concentrée de soude.

Mais il vaut mieux se servir d'une meule douce que de la lime, du tour ou du rabot.

La division d'un bloc d'Al. se fait de préférence à la fraise. A la scie circulaire elle se fait aussi facilement que si c'était du bois, à la condition de bien huiler l'instrument.

On peut fondre l'aluminium dans des creusets en terre (sans fondant, bien entendu), sans s'exposer à reduire la silice, à la condition que la température ne dépasse pas 800 degrés. On peut même opérer dans des creusets en fer dans les mêmes conditions. Il ne se forme pas alors d'alliages ferreux, ou s'il s'en forme un peu, comme il n'est pas fusible à cette température, il est attaché aux parois du creuset, qui peut, d'ailleurs, être tapissée d'une pellicule d'Al.

Mais il est préférable d'employer des creusets garnis de poussier de charbon que l'on recouvre d'un couvercle pendant la fusion.

M. Kiliani déclare que de semblables creusets durent des mois.

Lorsqu'il s'agit de masses considérables d'Al., on opère la fusion au four à réverbère dont la sole a été préalablement garnie comme les creusets. Le combustible est le bois ou le gaz, mais on les remplace avantageusement par le courant électrique.

L'essentiel est de ne pas dépasser beaucoup le point de fusion si l'on veut que le métal fondu conserve sa belle couleur blanche. Si la température est trop élevée, le métal prend une teinte légèrement bleutée. Ajoutons que l'Al. fondu est très fluide et conserve cette fluidité assez longtemps, contrairement à d'autres métaux qui ont besoin d'être chauffés bien au delà du point de fusion pour être bien fluides.

Dans le moulage, il faut tenir compte du retrait considérable de ce métal, qui est de 1,8 p. 100. C'est pourquoi il est nécessaire de réserver une forte masselotte qui *nourrit* le moulage pendant le refroidissement. C'est pourquoi aussi le sable du moule ne doit pas être très tassé ni trop séché afin de se prêter au retrait.

Lorsqu'on coule en coquille, il faut évidemment couler plus chaud, afin que l'écume puisse remonter à la surface, ce qui ne se ferait pas si la prise était trop rapide et l'homogénéité du métal en serait compromise.

La perte par seconde fusion est moindre pour l'Al. que pour la plupart des autres métaux. Lorsqu'on veut refondre des déchets d'Al., le mieux est de les comprimer préalablement en briquettes, autrement le déchet serait beaucoup plus important que par la fonte de morceaux compacts.

Nous avons déjà constaté que l'Al. pur se forge facilement à froid. Il faut remarquer d'ailleurs que, lorsqu'il a été travaillé à chaud, il a une résistance bien moindre et qui ne dépasse guère celle du métal fondu. Il va de soi qu'avant de forger un objet, on purifie la surface à la lime, à la fraise ou à la raboteuse.

Il en est de même pour le laminoir. Le laminage d'Al. est aussi facile que celui de l'or ou de l'argent et la battiture d'Al. supplantera facilement celle d'argent.

Pour faire des tôles d'Al., on commence par diviser un bloc, à surface unie, à la fraise; puis on introduit les plaques ainsi formées dans un moufle, où on les chauffe modérément. Puis on passe au laminoir. Dès qu'on atteint l'épaisseur de $0^{mm},5$ on continue le laminage à froid. Ce n'est qu'avant la dernière passe qu'on donne un léger recuit. Ainsi, par exemple, pour laminer de l'Al. pur, aussi bien que pour tréfiler, il ne faut pas chauffer à plus de 100 à 150 degrés.

EMPLOI DE L'ALUMINIUM

D'après ce qui précède, l'Al, apparaît comme un purificateur des métaux, notamment du cuivre et du fer.

L'exemple que nous citons plus loin de pièces de plusieurs tonnes de cuivre qu'on a pu mouler grâce à l'introduction d'une petite proportion d'aluminium, mérite d'être suivi de tous les fondeurs, et il est certain que déjà l'exemple de l'usine de Neuhausen a été suivi.

Nous donnons, ci-dessous, le détail des expériences qui ont permis de déterminer l'action purificatrice sur le fer et ses composés carbonés.

Aussi, en Allemagne comme en France, la plupart des grandes aciéries font une consommation importante d'Al. dans ce but, sans l'avouer, il est vrai. Mais les nombreuses lettres de commande que nous avons eues entre les mains ne permettent aucun doute à cet égard.

Quant à l'Angleterre et aux États-Unis, l'Al. y est employé à l'état de ferro-aluminium dans les aciéries, tandis que les usines françaises et allemandes, qui peuvent se procurer, dans leur pays même, de grandes quantités d'Al. pur, ont renoncé au ferro-alluminium obtenu par les procédés anciens de deux ans seulement, dont les produits retiennent des impuretés — le silicium notamment — en quantité assez grande pour nuire quelquefois à la qualité de l'acier qu'il s'agit d'épurer.

L'inoxydabilité de l'Al. et l'ensemble de ses propriétés chimiques le désignent pour être employé dans la batterie de cuisine [de préférence aux métaux actuellement usités; mais de préférence à cause du prix actuel du métal, pour les services de table : plats, aiguières, coquetiers, fourchettes et cuillers, brocs et cruches, timbales, etc.

Nous avons déjà parlé de son emploi pour les clefs, surtout celles destinées à être mises en trousseau et pour lesquels un allègement de poids est — indépendamment de l'inoxydabilité du métal — d'une grande utilité pratique.

L'Al. est depuis longtemps employé pour les intruments d'optique et l'abaissement énorme du prix depuis un ou deux ans ne peut que développer cet usage.

Il a d'ailleurs un emploi tout indiqué dans la fabrication des instruments de physique et de chirurgie, où l'inoxydabilité de ce métal et sa légèreté sont des qualités précieuses.

L'Al. est très sonore et pour cette raison peut être employé pour les instruments à vent. La réduction considérable de poids des gros instruments par

rapport à ceux qu'on fait actuellement en cuivre militera certainement en faveur de l'aluminium.

On doit admettre que la faible densité de ce métal le fera aussi rechercher pour les parties métalliques des ballons, principalement des ballons dirigeables; et nous savons que, déjà, des tentatives ont été faites à ce sujet.

On a aussi essayé, en Allemagne notamment, de faire en alluminium les hampes des lances qui sont en bois ou en tôle de fer.

On a essayé à employer l'aluminium pour les fils conducteurs des téléphones qu'on fait actuellement en bronze siliceux. Cette substitution aurait un intérêt à cause du poids que ces fils, de plus en plus nombreux dans les villes qui ne peuvent pas les placer dans les égouts comme à Paris, exercent sur les toits des maisons.

La résistance des fils en bronze siliceux est de 80 kilogrammes et la conductibilité de 43 p. 100. Or, un fil d'Al. de section 1 à la même conductibilité qu'un fil de bronze siliceux de section de 1,37. Comme les poids spécifiques des deux métaux sont respectivement 2,68 et 8,91, les poids seront dans le rapport de 1 à 4,55.

En faisant les calculs des prix on trouve que pour que la substitution soit avantageuse, il faut que le kilogramme d'aluminium (en fils) tombe à 17 francs; ce prix sera bientôt atteint; et on échappera aux difficultés que crée le poids du bronze siliceux à l'extension des réseaux téléphoniques.

Nous arrêterons là cette énumération des applications possibles de l'aluminium qui, dans les usages domestiques, sont illimités et qui s'étendront à mesure que ce métal sera plus connu et, en outre, à mesure que son prix baissera. Il est incontestable qu'un métal aussi léger et aussi propre chassera facilement les métaux tels que le zinc et le laiton, lourds et oxydables.

Les arts décoratifs tireront certainement un très grand bénéfice de l'emploi de l'aluminium.

Enfin, dans les objets d'un caractère particulièrement artistique on emploiera avec avantage des alliages d'argent et d'aluminium qui ont la beauté d'aspect et tous les avantages plastiques de l'argent tout en étant beaucoup moins lourds et moins coûteux. Actuellement un alliage de 90 p. 100 d'Al. et 10 p. 100 d'argent coûte déjà quinze fois moins cher que l'argent pur.

ALLIAGES DE L'ALUMINIUM

L'Al. communique aux métaux auxquels il est allié des propriétés remarquables qui, plus que les propriétés même de l'Al., ont causé le plus grand étonnement et la plus grande admiration dans le monde métallurgique.

Ce qu'il y a surtout de remarquable, c'est qu'il suffit de très petites additions d'Al. pour modifier considérablement les propriétés et les qualités des métaux et des alliages. Il en est ainsi notamment pour le fer *mitis* et pour le laiton d'Al. D'une façon générale, une très petite quantité d'Al. augmente la résistance, la durée et l'homogénéité des métaux auxquels il est allié.

1° BRONZES

Les bronzes d'Al. sont déjà connus, et Debray avait fait une étude de leurs propriétés; mais la fabrication en grand a donné une nouvelle importance à cette étude et permis de mieux apprécier les qualités des alliages ainsi formés entre l'Al. et le cuivre.

On les emploie pour la fabrication de tuyaux, coussinets, instruments d'optique et de physique de toutes espèces, et enfin dans la tréfilerie.

Les proportions de cuivre qui entre dans la composition de ceux des alliages qui ont un usage industriel, sont les suivantes :

9,5 à 10; 7 à 7,5; 5; 2 à 2,5 p. 100,

selon leur dureté décroissante.

Mais il ne faut pas oublier que dans la préparation de ces alliages, il est nécessaire d'avoir du cuivre et l'Al. très pur.

Ce qu'on nomme communément bronze d'Al. est le composé à 10 p. 100.

Les bronzes d'Al. se transforment facilement en fils de toute épaisseur et aussi en feuilles : tôle, clinquant ou battiture. Le peu d'altérabilité de cet alliage et sa belle couleur d'or permettent d'employer la battiture à la dorure du bois, ainsi qu'il a été fait à la vitrine de « l'Aluminium Company » à l'Exposition universelle (section anglaise). Le bronze à dorer contient 5, ou mieux 7,5 p. 100 de Al.

Comme exemple de bronze d'Al. à 5 p. 100, on peut citer douze candélabres de l'église Saint-Germain-des-Prés, à Paris, qui ont 2 mètres de haut. Ils existent sans altération depuis vingt ans.

La statue de W. Penn, à Philadelphie, qui doit être placée au sommet du dôme du nouvel hôtel de ville sera faite en bronze de cette espèce.

Les alliages à 2 ou 2,5 p. 100 sont utilisés pour les bronze d'art, car ils se ciselent très bien. Cependant ils sont un peu mous pour cet usage.

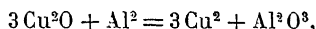
Le bronze à 10 p. 100 paraît être une véritable combinaison, car il n'est pas susceptible de se liquater, et en outre la fusion des deux métaux dans les susdites proportions se fait avec dégagement de chaleur. Telle est du moins l'opinion des auteurs anglais et américains. M. Kiliani la combat pour les raisons suivantes :

Lorsqu'on ajoute aux 90 p. 100 de cuivre les 10 p. 100 d'aluminium non en une fois, mais en plusieurs fois, il y a d'abord une grande élévation de température; les dernières additions donnent lieu à un abaissement de température, par absorption de la chaleur latente de fusion.

Or, tout cuivre du commerce contient de l'oxydule, et quand on le fond la proportion d'oxydule en est augmentée. C'est lui que l'Al. métallique réduit et l'oxydation de l'aluminium qui en résulte se fait avec un dégagement énorme de chaleur qui suffit à expliquer le phénomène dont il est question au moins pour une grande partie.

Supposons, par exemple, que le cuivre fondu contienne 0,45 p. 100 d'oxygène, de façon que les 100 kilogrammes de métal contiennent $4^{kg},02$ d'oxydule.

La décomposition de celui-ci exige 1.146 calories. D'autre part l'oxygène qui s'en dégage se combine avec $0^{kg},507$ pour former Al^2O^3, suivant la formule



$$3\,Cu^2O + Al^2 = 3\,Cu^2 + Al^2O^3,$$

qui, en se formant, dégage 3.300 calories. Il y a donc un excédent de

$$3300 - 1146 = 2154 \text{ calories.}$$

Or, il faut 0,1 calorie pour élever de 1 degré 1 kilogramme de cuivre, et par conséquent 10 calories pour les 100 kilogrammes de cuivre dont il est question. Donc, 2.154 calories élèveront la température de 215 degrés, quantité suffisante pour expliquer l'échauffement que l'on constate.

La couleur du bronze est celle de l'or vert et il peut recevoir un poli comparable à celui de l'acier.

Une des propriétés les plus précieuses de cet alliage, c'est qu'il résiste admirablement à l'eau, même acidulée, et n'est pas attaqué par les émanations de l'hydrogène sulfuré; c'est précisément en raison de cette propriété qu'on a pu l'employer en battiture pour la dorure d'objets en bois ou en autre substance. Nous donnerons ci-dessous quelques renseignements précis sur la résistance chimique de cet alliage.

Sa ténacité est comparable à celle de l'acier et la dépasse même notablement.

Sa résistance à la compression égale celle du meilleur acier fondu. Sa résistance à la flexion est quarante fois celle du laiton ordinaire.

Il est malléable à toute température, du rouge vif à la température ordinaire. Au rouge il est plus tenace et plus ductible que le cuivre pur. Travaillé à froid, il devient au contraire nécessaire de le recuire à chaque passe.

Il est donc utile de le laminer à une température aussi près que possible de son point de fusion, et il devient plus doux par recuits et trempes successives que par simple recuit.

La trempe se fait à l'eau froide.

Il est constant que la ténacité du bronze d'Al. augmente par deux ou trois refontes successives. Il est plus élastiques que l'acier et se soude bien; il se coule sous toute forme et se répand bien uniformément dans les moules en sable. Fondu en objets minces, il permet d'en reproduire les détails les plus délicats.

L'alliage à 10 p. 100 est plus dur que l'or monnayé; il prend un beau poli au brunissoir.

Son point de fusion est environ 950 degrés.

Le retrait après fusion est considérable : 1,8 à 2 p. 100.

Pendant la fusion, il n'absorbe de gaz que s'il a été chauffé trop longtemps et d'une façon exagérée. Son point de fusion, peu élevé, lui donne précisément cet avantage sur les autres bronzes d'éviter l'absorption des gaz, lorsque la fusion est bien conduite.

Dans le cas contraire, l'oxyde de carbone et la vapeur d'eau emprisonnés pendant la fusion sont brusquement expulsés pendant le refroidissement et l'alliage devient ainsi poreux.

Les alliages à différentes proportions peuvent d'ailleurs varier de coloration à volonté, soit par l'effet de l'acide nitrique, qui attaque le cuivre, mais non l'Al., soit par l'effet de l'acide chlorhydrique, qui attaque l'Al., mais non le cuivre.

Nous avons dit, plus haut, que le bronze à 10 p. 100 a une résistance comparable à celle de l'acier; mais, martelé, il a une résistance plus grande.

On le forge un peu au-dessous du rouge cerise, température qu'il atteint très rapidement dans un feu de forge, ainsi que je l'ai fréquemment constaté, et alors on peut le marteler jusqu'à froid, ainsi que nous l'avons dit, sans gerçure ni déchirure : en le détrempant, on le rend doux et malléable. Travaillé à chaud, on peut l'amener, sous le marteau, à un état de ténuité extrême.

Les propriétés mécaniques du bronze d'aluminium le mettent incontestablement au-dessus de tous les métaux, l'acier fondu compris, dont il a la résistance tout en ayant un allongement triple.

Nous donnons à l'appui de cette opinion le tableau suivant extrait de la brochure de M. Kiliani, directeur de l'usine de Neuhausen.

NOM DU MÉTAL	POIDS spécifique.	PRIX en francs[1].	RÉSISTANCE à la rupture; kilogrammes par millimètre carré.	SECTION en millimètres cubes pour 100 kilog. de résistance.	POIDS à égalité de résistance.	PRIX COMPARÉS à égalité de résistance.	PRIX COMPARÉS à volume égal.
Bronze Al. 5 p. 100 (40 p. 100 d'allongement). . . .	8,15	1,325	50	2,00	1,38	1,68	1,97
Bronze Al. 7,5 p. 100 (limite élastique 24k)	7,87	2,80	60	1,66	1,12	1,62	2,28
Bronze Al. 10 p. 100 fondu.	7,65	3,08	65	1,34	1,00	1,70	2,58
Laiton Al. 1 p. 100 fondu .	8,35	1,325	40	2,5	1,78	1,25	1,15
Laiton Al. 3,3 p. 100 fondu.	8,33	1,75	65	1,54	1,09	1,00	1,52
Bronze de canons 8 p. 100, étain	8,90	1,50	30	3,33	2,54	2,00	1,40
Laiton ordinaire laminé . .	8,38	1,15	22	4,35	3,24	1,95	1,00
Cuivre laminé	8,90	1,40	22	4,55	3,44	2,51	1,30
Bronze phosphoreux 0,38 p. 100 fondu	8,46	2,70	30	3,33	2,39	3,12	2,19
Métal Delta fondu.	8,51	1,90	38	2,63	1,90	1,88	1,68

[1] M. Kiliani donne le prix en marcks : 1 marck = 1 fr. 25.

Le bronze à 5 pour 100 a une résistance supérieure à celle du métal Delta avec un allongement de 60 à 70 p. 100, tandis que le métal Delta n'atteint que 40 pour 100. A égalité de résistance, le bronze d'Al. est *moins dur que le métal Delta.*

Comparé au bronze phosphoreux il est moins dur, non seulement à égalité de résistance, mais encore à égalité de volume.

Le tableau ci-dessus extrait de la brochure de M. Kiliani, et qui résume toutes les expériences faites à Neuhausen pendant un an, donne des comparaisons

utiles entre les propriétés mécaniques de différents métaux et alliages avec leurs prix.

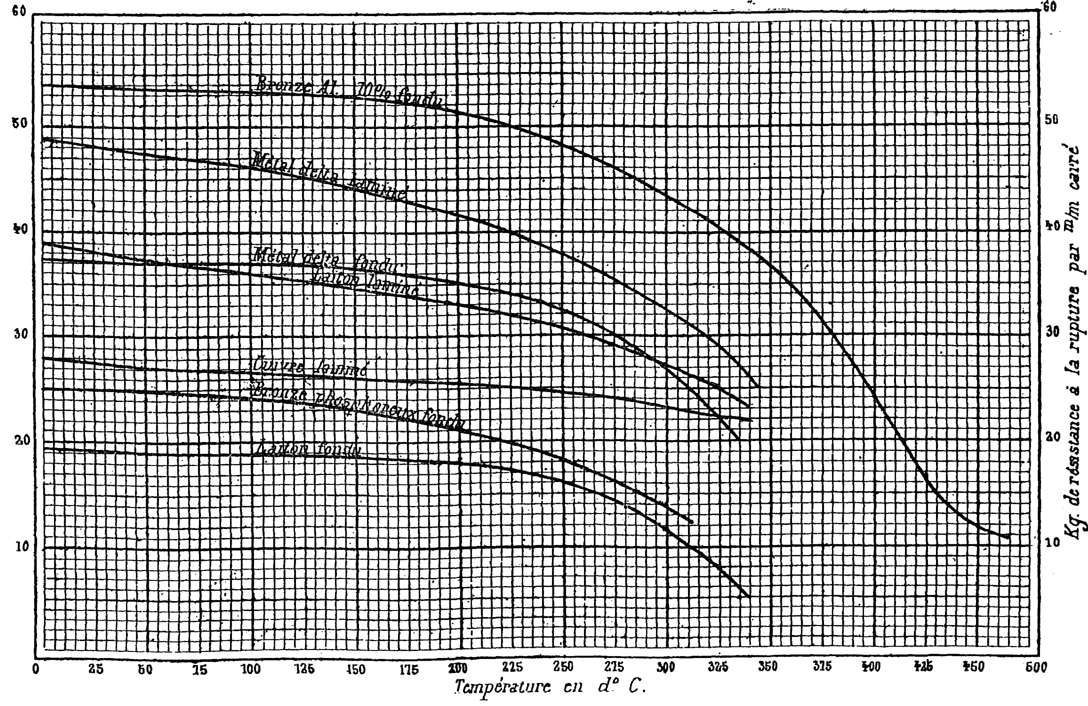
Lorsqu'on exige une certaine résistance avec le moindre poids, le bronze d'Al. à 10 p. 100 vient immédiatement après l'Al. pur.

Il ressort encore du tableau que la plus grande résistance pour le moindre volume correspond, parmi les métaux peu oxydables, au laiton d'aluminium. Puis viennent les bronzes d'Al. et loin derrière eux le bronze phosphoreux et le métal Delta.

Même lorsque le volume est donné et qu'on ne peut le réduire en proportion de la résistance, le laiton d'Al. est encore moins cher que le bronze phosphoreux et le métal Delta.

Le bronze d'Al. à 50 p. 100 est également moins cher que le bronze phosphoreux, tout en étant plus résistant et plus ductible.

La diminution de résistance avec la température a été étudiée par M. Le Chatelier, en France, et par M. Umvin en Allemagne. (Voir, à cet égard, le graphique ci-contre.)


Bronze Al. 10% fondu
Métal delta laminé
Métal delta fondu
Laiton laminé
Cuivre laminé
Bronze phosphoreux fondu
Laiton fondu
Température en d° C.
Kg. de résistance à la rupture par m/m carré

Remarquons que tous ces avantages du bronze d'Al. sont augmentés par sa résistance à l'oxydation par rapport au fer et à l'acier.

Comme le bronze ordinaire, le bronze d'Al. devient plus ductible et plus malléable par la trempe au rouge vif.

Cet alliage est un mauvais conducteur de l'électricité : à 1 p. 100 elle est de 18 p. 100 de celle du cuivre pur; à 5 p. 100 Al. elle est de 13 p. 100 et à 10 p. 100 Al. de 6 p. 100 de la conductibilité du cuivre.

Il dépasse tous les alliages par sa résistance aux agents chimiques. Cette résistance est proportionnelle à la contenance en Al. et inverse à celle en silicium. Ainsi, 3 p. 100 de silicium suffisent pour que le bronze verdisse à l'air au bout de 24 heures.

Dans le laboratoire de Neuhausen, on a plongé des plaques de dimensions identiques dans une solution contenant 3 p. 100 de NaCl. et 4 p. 100 d'acide acétique, à la température de 80-90 degrés et cela pendant 14 heures. L'usure proportionnelle des différentes plaques est résumée ci-dessous :

1) Bronze 10 p. 100 Al. sans Si	1,0
2) Bronze 10 p. 100 Al. avec Si = 2,8 p. 100	2,1
3) Laiton Al. 3,5 p. 100	4,4
4) Métal Delta	6,3
5) Bronze phosphoreux	32,0

On a refait l'expérience avec de l'eau de mer, et on a obtenu au bout de 18 heures les résultats suivants :

1) Bronze Al. 10 p. 100 sans Si	1
2) Bronze Al. 10 p. 100, 2,8 p. 100 Si	39
3) Laiton Al. 3,5 p. 100	101
4) Bronze phosphoreux	116
5) Métal Delta	450

On voit immédiatement l'influence néfaste du silicium.

Une autre expérience a été faite avec de l'eau de mer à la température ordinaire, mais en mettant les lames d'épreuve en contact avec des lames de fer de même dimension. L'épreuve a duré 24 jours.

On a obtenu les résultats suivants :

	PERTE	
	de l'alliage.	du fer.
1) Bronze Al. 10 p. 100 sans Si	1	172
2) Bronze Al. 10 p. 100, 2,8 p. 100 Si	2	86
3) Laiton Al. 3,5 p. 100	9	172
4) Bronze phosphoreux	40	86
5) Métal Delta	50	198

Dans ces conditions, le fer avec l'alliage forme un couple électrolytique.

Dans toutes ces expériences, on a eu soin de laisser une partie des lames hors du liquide pour permettre l'accès de l'air, qui facilite l'attaque.

La perte absolue du n° 1 a été de $0^{gr},083$ pour une surface de 1 mètre carré.

Ainsi aucun métal ne résiste à l'eau de mer comme le bronze d'Al.

La résistance supérieure du bronze d'Al. non silicé le fera préférer à l'autre, malgré que sa résistance à la rupture soit moindre; car, en compensation, il est aussi plus élastique.

Dans l'eau de mer le fer en contact avec le bronze d'Al. ne produit aucune action, tandis que cette action est forte avec le laiton d'Al.

On a essayé le bronze d'Al. dans les fabriques de celluloïd où l'on emploie des sulfites alcalins; les armatures en cette matière ont duré *sept* fois autant que celles que l'on a coutume d'employer en bronze phosphoreux.

Les résultats sont analogues pour d'autres liqueurs acides.

Lorsqu'on fond le bronze d'Al. dans un creuset en graphite, il prend un peu de silicium, quoique en très petite quantité, à moins qu'il ne soit en rognures. En général, il est préférable d'ajouter les rognures à du bronze déjà en fusion; alors le silicium introduit est insignifiant.

La refonte de l'alliage donne lieu à une perte qui va de 2 à 5 p. 100 au plus, et elle est généralement répartie proportionnellement sur les deux métaux. Cependant, pour de petites quantités soumises à plusieurs refontes successives, la perte porte plus sur l'Al.

Au four à réverbère il convient de faire la fusion en creusets couverts.

L'Al. étant un véritable purificateur des métaux (par la réduction des oxydes), l'on comprend que le bronze d'Al. doit être particulièrement dépourvu de bulles. Cependant la fusion de cet alliage en moulages exige beaucoup de précautions.

Une des principales difficultés de cette opération provient du retrait considérable de l'alliage (1,8 à 2 p. 100).

On déduit de là qu'il faut laisser une surface libre par où le moulage le *nourrit* alors qu'il est encore liquide, que l'on coule en sable ou en coquille.

Lorsqu'on coule un prisme couché avec la face supérieure découverte, on remarque après refroidissement que celle-ci possède un sillon médian assez profond. Cela tient à ce que le refroidissement a été plus grand sur les faces couvertes que sur celle à l'air, et il en résulte qu'au centre le métal est particulièrement doux. Lorsqu'il n'y a pas de face découverte, mais simplement des conduits pour l'adduction du métal, il importe qu'ils soient assez grands pour que le métal du centre se nourrisse de haut en bas.

Contrairement à un préjugé répandu, la coulée est aussi bonne en sable qu'en coquille, et dans aucun cas il n'y a de liquation à craindre. Cependant, dans ce dernier cas l'allongement du métal est plus grand. Cela tient au refroidissement plus rapide des parois pendant que le centre reste à l'état pâteux. Cette différence se remarque surtout pour les alliages à basse teneur d'Al.

En raison du retrait considérable de l'alliage, il est nécessaire, lorsqu'on a affaire à de grandes masses, de réserver dans le moule de larges canaux d'adduction afin de faciliter la *nourriture* de la coulée. Avec de petits canaux, on s'expose à ce que la pièce fondue contienne des porosités ou des cavités. Ces canaux seront donc larges et cylindriques et c'est par eux que le métal doit se nourrir, non par les entonnoirs qui surmontent les canaux adducteurs. Les nombreuses coulées auxquelles j'ai assisté me font attacher une grande impor-

tance à ces recommandations dont l'oubli expose l'opérateur à des déceptions quant à la régularité de la pièce coulée.

Lorsque la forme de la pièce est telle que les canaux adducteurs ne sont pas ouverts à l'air mais fermés, il est également nécessaire qu'ils soient de dimension assez grande, car c'est par eux que la pièce se nourrit; et, s'il en est ainsi, les cavernes se trouvent dans ces parties, tandis que le corps de la pièce est sain et continu.

Pour combattre le retrait en sable, on a soin de ne pas le tasser fortement, surtout dans le noyau, et on le perce de nombreux trous pour le dégagement de l'air et des gaz.

Une autre précaution contre le retrait consiste à couler à la température la plus basse possible, surtout lorsqu'il s'agit de pièces épaisses : les objets minces doivent naturellement être coulés très fluides. La précaution est d'autant plus facile à observer que le métal conserve longtemps sa fluidité, comme d'ailleurs tous les alliages d'Al.

Lorsqu'au contraire on se trouve dans de bonnes conditions pour la succion parfaite de l'alliage pendant le retrait, il n'y a pas d'inconvénient à couler très chaud. En tous cas, il faut couler d'autant plus chaud que l'alliage a moins d'Al.

Mais la coulée à température basse a l'inconvénient d'introduire dans la masse des pellicules d'oxyde (Al^2O^3) qui se forment au contact de l'air, ainsi qu'il arrive dans la coulée de tous les métaux. On se trouve donc placé dans un dilemme, et il s'agit de trouver, par la pratique, la moyenne dans laquelle on doit opérer.

Lorsqu'on coule en sable on s'arrangera donc de manière à avoir un très fort entonnoir de coulée, par où les pellicules d'oxyde seront amenées à la surface à mesure de leur formation; on a ensuite des canaux adducteurs longs et étroits afin qu'en coulant très fluide le métal puisse se refroidir; mais le mieux sera d'y pratiquer des évents.

Enfin, lorsqu'on coule un objet horizontal avec surface supérieure libre, il convient de couler de bas en haut, et alors on enlève l'écume à la surface avec une béquille. Dans ce cas il faut couler très chaud.

Ajoutons qu'il est de toute nécessité que les moules soient bien secs pour éviter la formation de vapeur d'eau.

Enfin, étant donné que les qualités du métal s'améliorent par le forgeage ou le laminage, il ne faut faire de pièces coulées que si on ne peut faire autrement.

Nous avons déjà cité la propriété si remarquable du bronze d'Al. de se laisser forger à une température comprise entre le rouge sombre et le rouge cerise. Plus la température est basse, plus la résistance de la pièce forgée ou laminée est grande ; l'allongement suit une proportion inverse, naturellement.

Le métal est d'autant plus mou que la proportion totale d'Al. et de Si. est plus grande. Mais l'accroissement de la proportion de silicium exige une température croissante pour éviter les gerçures. Au contraire, le bronze dépourvu de silicium se forge jusqu'à la température ordinaire. De même, dès que la proportion de fer atteint 1,5 p. 100, l'alliage est cassant sous le marteau. D'ailleurs, il ne faut jamais commencer le forgeage à froid, si l'on veut éviter les gerçures et les solutions de continuité.

A la température du rouge cerise, l'alliage à 10 p. 100 est tellem‹ı léable qu'on peut lui donner, sous le marteau, les formes les plus délié‹›

Le laminage doit se faire au rouge; lorsque la proportion d'Al. d‹' 5 p. 100, on peut laminer à froid, mais avec des chaudes et trempes sives. En général, il ne faut laminer à froid que si l'on tient à obtenir ι ou un fil particulièrement durs ou que l'on tienne à un beau poli.

Pour éviter l'introduction de pellicules d'oxyde, on trempe les tôl‹ l'eau acidulée entre chaque opération.

EMPLOI DU BRONZE D'ALUMINIUM

Cet emploi est basé sur ce fait qu'aucun métal, sans en excepter l'a‹ possède à résistance égale un allongement comparable. En effet, le forgé, laminé ou comprimé, atteint et dépasse la résistance de l'acier et s' deux ou trois fois autant. Tel est le fait important sur lequel on ne saur insister, car il est encore insuffisamment connu.

Un autre fait qu'il importe de mettre en lumière, c'est que sous le r bronze d'Al. on comprend une foule de produits de teneur variable en A l Si. qui ont tous des propriétés particulières et que chacun d'eux corres des emplois différents. Cette remarque est nécessaire pour détruire c préjugés qui tiennent à la confusion qu'on fait encore entre les qualités ‹ duits réellement très différents entre eux et qui font, notamment, attr tel produit un défaut inhérent à un produit d'autre composition.

Ainsi, pour les proportions d'Al. et de Si. on peut donner au bro: résistances à la rupture variant de 40 à 80 kilogrammes, et des allongem 80 p. 100 à 1 p. 100.

Des objections basées sur le prix du bronze d'aluminium sont aussi er ainsi qu'il est prouvé par le tableau de M. Kiliani que nous avons reprod en ressort, au contraire, que ce prix est, à qualité égale, moindre que ce autres alliages.

Il est vrai que si on se donne le volume, le prix du bronze d'Al paraître supérieur; mais il faut remarquer que, même dans ce cas, il y sur le poids au point que, même le bronze à 5 p. 100 Al. est à volur moins cher que le bronze phosphoreux.

Prenons, par exemple, le cas de tubes. Il résulte des renseignemen nous avons fournis qu'on peut diminuer leur épaisseur lorsqu'ils sont en l d'Al., au point que des tubes en cuivre de même résistance coûtent une demie plus cher.

Même dans le cas où notre alliage est réellement plus coûteux, on re l'excédent de prix par la plus grande durée, comparativement à d' métaux.

Ainsi, le bronze d'Al. est préférable dans tous les cas où l'on exige la tance, la dureté et la ténacité unies à une grande faculté d'allongement. est de même lorsque les objets sont exposés à de fortes pressions ou

frottements importants. Par exemple, il se prête admirablement à la fabrication de roues d'engrenage. C'est ainsi qu'on a fabriqué à Neuhausen des roues dentées pour laminoirs pesant 300 kilogrammes, qui depuis des mois n'ont pas présenté de trace d'usure. De même, pour crémaillères, cames, foulons, chaudières à vapeur, éléments de pompes et de machines de toute espèce, ventilateurs, etc...

Pour tous ces emplois, le bronze d'aluminium a l'avantage sur les autres alliages de cuivre — à volume égal — d'une plus grande résistance unie à un plus grand allongement, par conséquent, de la sécurité; c'est-à-dire qu'en diminuant le volume en proportion de la résistance plus grande du bronze d'Al., on a l'avantage d'un poids et d'un prix moindres.

Nous avons remarqué plus haut qu'un tube en bronze d'Al. est moins cher qu'un tube en cuivre de même usage, il faut ajouter qu'il est d'un poids trois fois moindre que celui de même résistance en cuivre ou en laiton ordinaire.

Un foyer de locomotive fait en bronze d'Al., même à 5 p. 100, aurait une épaisseur de tôle moitié moindre qu'en cuivre et aurait un poids moitié moindre, tout en étant notablement moins cher. Il faut ajouter qu'il serait moins oxydable à haute température que le cuivre.

Cet alliage qui a une résistance et un allongement triple de l'acier a donc une grande supériorité sur lui pour les objets soumis à des replis ou à des chocs; sans compter son inoxydabilité. Cette dernière qualité a une importance énorme dans une foule de cas, par exemple, dans les mines, les salines, les usines chimiques, endroits où il règne une grande humidité.

Il en est de même des vis et des écrous dans les endroits humides, notamment sur les navires.

Des câbles en bronze d'Al. auraient toutes les qualités de résistance de ceux en acier avec moins de raideur et l'oxydabilité en moins. De plus, après usure, le bronze d'Al. conserve sa valeur comme métal, tandis que le câble usé en acier ne vaut plus que le prix de la basse ferraille.

La Société alpine a fait l'essai d'un fil de bronze d'Al. de 1 millimètre d'épaisseur qui avait une résistance à la rupture de 100 kilogrammes et qui a subi 28 flexions sur un cercle de 5 millimètres de rayon, tandis que le bronze siliceux n'avait que 70 kilogrammes de résistance et ne supporta que 8 flexions.

La Société Escher, Wyss et Cie a mis en service, en 1889, un petit bateau mu par l'huile de naphte, dont toutes les parties métalliques apparentes sont en bronze d'aluminium à 7 1/2 p. 100 qui a conservé depuis plus d'un an son éclat primitif, tandis que sur d'autres bateaux, les parties similaires qui sont en laiton ordinaire ont perdu tout leur éclat et ont noirci.

Dans le harnachement les boucles en acier s'oxydent, même étamées, et entament le cuir : il y aurait avantage à les faire en bronze d'Al.

En Angleterre et en Belgique on emploie à cet usage le bronze phosphoreux et, depuis 1872, on l'a introduit dans l'armée. Il est incontestable, qu'en comparaison, le bronze d'Al. a meilleur aspect et coûterait moins cher.

Nous avons prouvé sa résistance à l'eau de mer; l'emploi en est donc indiqué pour les hélices et le doublage des navires.

Comparé au bronze phosphoreux, il y a une économie de poids de près de

10 p. 100 à volume égal. A résistance égale, le poids est 2,39 fois moins grand. La proportion est de 3,44 par rapport au cuivre : le tout indépendamment de la résistance chimique à l'eau de mer. L'emploi du bronze d'aluminium pour les navires sera donc la source de grandes économies.

Une autre économie résultera encore de la possibilité de réemployer la matière arrivée à sa limite d'usure sans perte de poids notable.

On peut encore employer le bronze d'Al. pour la fabrication des cylindres tamiseurs dans les papeteries ou autres industries; pour les cylindres compresseurs de toute espèce et, en général, pour tout emploi où on exige un métal dur et résistant sans être cassant.

C'est ainsi qu'il est encore tout indiqué pour les collecteurs de dynamos, pour les buses des hauts fourneaux où les ruptures sont à redouter à haute température.

Enfin, un grand avenir est réservé à cet alliage pour les bouches à feu.

Nous avons déjà vu qu'à égalité de résistance il est 2,5 fois plus léger que le bronze ordinaire d'étain. Il est même supérieur à l'acier fondu, puisqu'à égale résistance il est susceptible d'un allongement de 2 à 3 fois plus grand.

Il résiste mieux que le bronze ordinaire à l'action chimique des gaz de la poudre et n'est pas exposé, comme lui, à la production des cavités par liquation.

Ensuite, il s'échauffe moins au tir à cause de sa grande chaleur spécifique et permet ainsi de tirer un plus grand nombre de coups de suite qu'avec les canons en bronze d'étain ou en acier.

De plus, la résistance du bronze d'Al. ne décroît sérieusement qu'à partir de 350 degrés. A 300 degrés, elle est encore de 45 kilogrammes, tandis que celle du bronze phosphoreux n'est plus que de 13 kilogrammes (Unwin).

Il l'emporte sur l'acier par son inoxydabilité.

Enfin, ainsi que M. Cowles l'a fait remarquer à l'institut d'Annapolis, il y a quatre années déjà, un canon en bronze d'Al. hors d'usage peut être refondu à peu de frais, tandis qu'un canon en acier, dans les mêmes conditions, n'est plus que de la ferraille.

Nous appelons l'attention de l'administration de la guerre sur ces propriétés remarquables du bronze d'Al. qui, à notre avis, doit remplacer toute autre matière employée à la fabrication des bouches à feu.

Le bronze d'Al. serait particulièrement avantageux pour les fusils de chasse.

Il est excellent pour les ressorts de toute sorte et, principalement pour les ressorts de montre, aussi bien que pour leurs roues d'engrenage; car, par ce temps d'extension des machines électriques, il est utile d'avoir des montres qui ne soient pas sujettes à l'aimantation.

Les bronzes à basse teneur seront réservés pour les objets d'art, candélabres, cafetières, cuillers, etc...

Enfin, on peut aisément le tréfiler.

On a essayé des bronzes à 60 ou 70 p. 100 de Al., ceux-là sont durs et cassants comme du verre et possèdent une belle texture cristalline. L'alliage à 50 p. 100 est au contraire mou; à 30 p. 100 il redevient dur. A 20 p. 100 il a une

teinte blanc-jaunâtre et ressemble au bismuth; il est très cassant et peut être pulvérisé dans un mortier. Ce n'est qu'au-dessous de 11 p. 100 que ces alliages sont susceptibles d'un usage industriel. Tous les bronzes au-dessous de 11 p. 100 peuvent être laminés et étirés.

Le bronze à 5 p. 100 qui a encore une résistance à la rupture de 47 kilogrammes par millimètre carré, a un allongement de rupture de 70 p. 100. Cette propriété remarquable et unique parmi les métaux et alliages dont la résistance est analogue lui assure de nombreux emplois industriels.

De même que l'Al. mélangé au cuivre accroît sa dureté, de même une petite quantité de cuivre mélangé à l'Al. accroît la dureté de ce métal; mais il ne paraît pas que cette propriété ait été jusqu'ici, susceptible d'une utilisation industrielle étendue.

Lorsque l'Al. contient 4 p. 100 de fer, alliage qui est un excellent métal de forge, il devient difficile de le laminer sous une épaisseur de quelques millimètres : il se gerce dans le sens du laminage.

Nous étudierons, d'ailleurs, avec détails, les alliages de fer et de Al.

Nous avons trouvé dans l'*Engineering and mining journal* (publication qui paraît à New-York), une note de M. Browne et Boly (demeurant 11, Queen Victoria street, à Londres), certifiant qu'ils ont commandé en 1887, à M. Cowles, 20 tonnes de bronze d'Al. sous cette condition que la résistance à la rupture serait d'au moins 44 tonnes par pouce carré (6.914^{kg},7) par centimètre carré et 5 p. 100 d'allongement et que ces conditions ont été notablement dépassées. Ces messieurs font le plus grand éloge de ce bronze, dont la densité est 7,56, tandis que celle du laiton est de 8,6 et celle du bronze d'étain de 8,44 à 9,24. Ils sont, en somme, très satisfaits du produit qui leur a été livré.

[M. Cowles, dont il sera souvent fait mention dans le cours de ce travail, est l'auteur d'un procédé de fabrication du bronze et des différents alliages d'aluminium, qui a eu un grand retentissement.]

Le bronze d'Al., d'après le même auteur, a une supériorité marquée pour la fabrication des coussinets, il en est de même pour les organes des pompes et les hélices des navires; d'une manière générale, il est d'un emploi avantageux non seulement dans la plupart des applications de l'acier, mais encore dans tous les cas où l'on exige un métal résistant à l'action de l'eau ou des acides.

La célèbre maison *Wistington*, aux États-Unis, s'est fait une spécialité dans l'emploi du bronze d'aluminium pour la fabrication des pompes.

Dans une communication faite à l'Institut naval d'*Annapolis*, M. Cowles dit que ce métal a les qualités d'un bronze à canons parfait. D'abord, il est d'une préparation fort simple; puis il est parfaitement homogène et ensuite, avec un moindre poids qu'un canon en bronze d'étain, il résiste à une pression intérieure bien plus considérable. Les canons exigent, en effet, un métal se comportant comme un puissant ressort, résistant avec raideur à la pression des gaz de la poudre, et reprenant identiquement sa forme primitive après le tir; il faut, en outre, qu'il ait une dureté suffisante pour que ses parois et les flancs des rayures résistent au frottement des projectiles ; c'est le cas du bronze d'Al.

M. Cowles recommande l'emploi de cet alliage pour les hélices des navires,

les éperons et même le cuirassement. Il pense qu'en remplaçant dans un navire l'acier par le bronze d'Al. on économiserait les 2/3 du poids; cette économie du poids équivaudrait à un accroissement de la vitesse des navires, c'est-à-dire à accroissement de ses qualités militaires.

Actuellement, aux États-Unis, on fait toutes les hélices en bronze d'Al.

Déjà, en 1859, on avait fait en France l'essai d'un canon de 4 rayé en bronze d'Al. Le prix élevé de l'Al., à cette époque, a seul fait rejeter l'emploi de ce métal dans l'artillerie.

M. Cowles prétendait être en mesure de livrer un canon en bronze d'Al. 20 p. 100 meilleur marché qu'un canon en acier de même calibre; il a fait remarquer, en outre, que 68 p. 100 du prix est représenté par un métal qui peut indéfiniment resservir, sans déchet ni dépréciation, tandis qu'un canon en acier, usé ou détérioré, ne vaut plus que le prix de la ferraille.

Dans ce même mémoire, M. Cowles donne le détail de ses expériences sur la résistance des alliages qu'il a fabriqués.

Nous les reproduisons dans le tableau suivant :

BRONZES COWLES

NATURE DE L'ALLIAGE	RÉSISTANCE à la rupture par millimètre carré.	LIMITE d'élasticité.	ALLONGEMENT p. 100.
	kilogrammes.		
Bronze A_1 [Cu 89, Al. 10, Si 1]	67,1	49,0	0,5
Bronze A_1 [Cu 89, Al. 10, Si 1]	50,9	23,2	3,6
Bronze A_1 forgé au rouge	57,4	26,7	5,2
Bronze A_1 forgé au rouge	61,5	28,8	2,0
Bronze A_2 coulé en sable	61,5	»	17,0
Bronze A_2 coulé en sable	58,9	»	35,5
Bronze A_3 [Cu 91,75, Al. 7,5, Si 0,75] en coquille .	49,0	15,1	32,8
Bronze A_3 [Cu 91,75, Al. 7,5, Si 0,75] en coquille .	47,8	16,8	13,3
Bronze A_3 [Cu 91,75, Al. 7,5, Si 0,75] en coquille .	46,7	16,8	13,3
Bronze A_3 [Cu 91,75, Al. 7,5, Si 0,75] en coquille.	42,8	12,6	26,2
Laiton n° 1 [Cu 71,25, Al. 3,75, Zn 25] en coquille .	44,6	15,1	11,2
Laiton n° 2 [Cu 63,33, Al. 3,33, Zn 33,33].	53,9	33,0	3,5
Laiton n° 2 [Cu 63,33, Al. 3,33, Zn 33,33]	58,2	13,3	3,33

Essai des bronzes d'Al. produits à l'usine de Milton.

Extraits de la *Revue universelle* de Liège (octobre 1889).

MARQUE	TENEUR POUR CENT EN			RÉSISTANCE à la rupture par millimètre carré.	ALLONGEMENT p. 100
	Al.	Si.	Cu.		
Spécial dur A. .	10 à 11	1 à 2	89 à 87	70,9 à 78,75	0 à 5
— A_1 .	9,0	1,8	89,2	63,0 à 70,9	4 à 8
— A_2 .	8,5	1,5	90,0	53,55 à 99,25	8 à 17
— A_3 .	6,5	1,5	92,0	44,1 à 50,40	18 à 25
— B_1 .	»	»	»	39,40 à 44,10	25 à 30
— C_1 .	4,5	1,0	94,5	33,20 à 39,4	30 à 35
— C_2 .	»	»	»	30,35 à 33,20	35 à 40
— C_3 .	»	»	»	23,6 à 30,35	40 à 50
— D. .	2,25	1,0	96,75	19,0 à 23,60	45 à 60
— E. .	»	»	»	13,20 à 19,0	20 à 35

Ces résultats diffèrent de ceux obtenus à Lockport, en ce qu'ils sont plus réguliers. Les produits à teneur élevée en Al. sont, en outre, plus résistants. Enfin, en laissant de côté le produit E sur lequel les renseignements manquent, pour tous les autres la ductilité est inverse de la résistance à la rupture qui est elle-même dans le sens de la teneur en Al. (presque exactement proportionnelle).

On a obtenu des éprouvettes du bronze à 11 p. 100, dont la résistance à la rupture a été de 93 kilogrammes (même mémoire).

L'auteur ajoute : la limite d'élasticité de ces bronzes est considérable et égale fréquemment la charge de rupture.

[R. Van Langhenhove (*Revue de Liège*)].

Le tableau ci-dessous est extrait de la *Revue universelle* de Liège (déjà cité) et montre que le bronze d'aluminium coulé donne des résultats supérieurs aux meilleurs aciers fondus.

MARQUE	TENEUR POUR CENT			RÉSISTANCE à la rupture par millimètre carré.	ALLONGEMENT p. 100.	DISTANCE entre les repères en millimètres.	REMARQUES
	Cu	Al.	Si.				
				kilogrammes.			
A	89,00	10,00	1,0	66,95 à 80,39	0,5 à 4,5	»	Essayé par le département de la marine aux Etats-Unis.
A coulé en sable.	»	»	»	68,36 à 83,25	»	»	Arsenal de Waterton (Etats-Unis).
A coulé en sable.	»	»	»	91,26	»	»	Forges de Leeds (Angleterre)
	88,72	8,92	1,74 et 0,515 de fer.	91,29	»	»	Forges de Leeds (Angleterre).
A	89,00	10,00	1,0	81,22	6,9	»	Arsenal de Malines
A_2.	90,00	8,5	1,5	70,9	8,0	»	Arsenal de Woolwich.
A_3.	92,00	6,5	1,5	68,5	16,0	»	Arsenal de Woolwich.
		5,0		60,0	60,0	50,8	Usine du Phénix à Rurhort.

Citons, enfin, un essai sur un laiton d'aluminium à 3,33 p. 100 Al., avec 0,6 p. 100 de Si et 33,33 de Zn dont les propriétés sont les suivantes :

Charge de rupture.	50^k,60.
Limite d'élasticité	47^k,25 avec allongement de 0,6 p. 100.
Longueur entre les repères . .	$20^m/^m$, 3.

Cet alliage subit des chocs violents sans se briser et a une supériorité marquée pour la fabrication des coussinets. En faisant la comparaison en cours d'usage de deux coussinets, l'un en bronze ordinaire, l'autre en laiton d'Al. (à Dudley), on a trouvé que le premier présentait de fortes traces d'usure au bout d'un an, tandis que le second était intact.

M. Kosmann, de Breslau, dans un article inséré dans la livraison de février 1889 « Stahl und Eisen », a étudié les alliages alumineux produits par l'usine *Hemelingen* de Brême.

Il cite ce fait, que nous rappelons en différents endroits, que Al. ajouté à du cuivre en fusion et mélangé intimement avec lui, apaise l'ébullition et rend ainsi l'alliage plus homogène que le cuivre fondu, et augmente la température en même temps que la fluidité. Ce même phénomène se produit lorsqu'on le mélange à la fonte en fusion ou à l'acier. La température qui peut ainsi s'élever jusqu'au blanc, baisse ensuite peu à peu si la proportion de Al. dépasse 2 p. 100.

L'auteur reconnaît que l'alliage n'est pas facilement oxydable, même à une haute température, à condition qu'on procède rapidement à la coulée.

L'avantage de cet alliage, c'est qu'on peut le refondre indéfiniment sans nuire à l'homogénéité du métal. Et c'est ainsi que M. Cowles a pu dire que le métal en bronze d'Al. garde sa valeur lorsque le canon est mis hors d'usage par l'usure, et cette propriété n'est pas celle qui militera le moins en faveur de l'emploi du bronze d'Al. dans l'artillerie.

D'après M. Kosmann, les densités des différents bronzes sont les suivantes :

Cu 97,5 — Al. 2,5	Densité = 8,6
Cu 95,0 — Al. 5,0	Id. = 8,2
Cu 90,0 — Al. 10,0	Id. = 7,6
Cu 75,0 — Al. 15,0	Id. = 7,05
Cu 80,0 — Al. 20,0	Id. = 6,42

D'une façon absolue, le bronze à 10 p. 100 Al. est aussi lourd que l'acier fondu ou le fer forgé; mais si on tient compte de sa résistance supérieure, on reconnaît l'avantage qu'il présente sur ces métaux dans la construction; on peut dire que l'Al. pur excepté, il est le plus léger des métaux à résistance égale.

Ces nombres diffèrent peu de ceux fournis par MM. Cowles frères.

Les résistances des bronzes de Hemelingen sont les suivantes :

10 p. 100 Al. résistance à la traction = 70	kilogrammes par millimètre carré.
5 p. 100 Al. résistance à la traction = 40	—
Tôle de bronze à 10 p. 100 à la traction = 83	—

Le tableau suivant donne les résultats des expériences faites par M. Tetmajor, de l'école polytechnique de Zurich, sur le bronze d'Al. fourni par la Société suisse établie à Neuhausen, près Schaffouse, qui exploite le brevet Heroult (1) :

NATURE DU MÉTAL	RÉSISTANCE à la rupture en kilogrammes par millimètre carré.	ALLONGEMENT p. 100.
	Kilogrammes.	
Bronze d'aluminium A	36,6	25,4
— B	38,4	27,4
— C	36,4	34,3
— D	48,0	37,3
— E	51,6	39,2
— F	56,0	23,0
— G	62,1	18,5
— H	64,0	7,0
En comparaison avec les produits ci-dessous :		
Laiton alumineux	48,1	20,7
Acier pour canons de fusil	55,0	14,0
Fer en barres	38,0	22,0
Métal Delta	38,0	20,0
Bronze ordinaire	23,0	8,0
Bronze phosphoreux	29,0	17,0
Bronze manganeux	29,0	17,0

(1) Il s'agit de la société qui a précédé la société actuelle, dans la même usine.

Il est regrettable qu'on n'ait pas produit en regard la composition chimique de ces alliages. Mais ce qu'il y a de certain c'est que de la qualité A à H il y a une proportion croissante d'aluminium.

Il me paraît utile, avant de quitter ce sujet, de faire quelques remarques sur les tableaux de résistance que j'ai reproduits.

Il est d'abord inconstestable que certains bronzes d'aluminium, surtout lorsqu'on se rapproche de la proportion 10 p. 100 Al., dépassent en résistance le meilleur acier. Ensuite les irrégularités dans les allongements rapportés par M. Cowles dénotent ou des erreurs d'expérience ou une certaine irrégularité dans la fabrication, ainsi qu'il arrive lorsqu'une méthode n'est pas entrée dans la métallurgie courante. Il est certain que, sous ce rapport, des progrès ont été réalisés depuis ces expériences et on ne tardera pas à avoir pour chaque nature de produit et pour chaque procédé de fabrication des coefficients à peu près constants, condition indispensable pour établir entre eux des comparaisons fructueuses. Le tableau de M. Tetmajor montre, en outre, que tandis que la résistance croît avec la proportion d'Al., l'allongement proportionnel passe par un maximum.

Quoi qu'il en soit, il faut attendre que la production de chaque usine ait pris une allure normale et donné des produits constant pour établir des coefficients ayant une valeur pratique définitive.

En ce qui concerne l'emploi du bronze d'Al. dans l'artillerie, il est encore bon d'appeler l'attention sur ce fait que cet alliage ne présente jamais de bulles ni de soufflures et que c'est sans doute ce caractère qui lui donne, en partie, une supériorité de résistance sur les meilleurs aciers.

Si l'on est arrivé à produire couramment des canons de campagne en acier parfaitement homogène, il n'en est pas de même des grosses pièces de siège ou principalement de celles qui servent à la défense des côtes ou à l'armement des navires de guerre.

Les exemples ne manquent pas dans différents pays d'éclatement de gros canons d'acier. De pareils accidents ne sont pas à craindre avec le bronze d'Al.

L'inaltérabilité de ce métal dans l'eau a été mis en relief par la commission autrichienne, qui a comparé deux fusils, l'un ayant une culasse en acier et l'autre en bronze d'Al. qui ont été immergés pendant un mois dans l'eau.

Lorsqu'on les a retirés, le fusil à culasse de bronze à pu servir immédiatement au tir, sans nettoyage; quand à celui en acier, il était absolument hors d'usage.

Nous terminerons ce paragraphe en reproduisant le tableau de M. Cowles (qui a déjà deux ans de date), où il compare le prix de ces propres produits avec ceux d'Allemagne (sans doute d'Hemelingen), cités par M. P.-W.-L. Biermann, de Hanovre.

Les prix allemands et américains sont indiqués en cents par livre : le cent vaut $0^f,05$ et la livre $\frac{1^{kg}}{2,2}$. Nous plaçons à côté les prix en francs par kilogramme.

	BRONZES AL.				FERRO-ALUMINIUM		CUIVRE SILICÉ			
	Al. °/₀.				Al. °/₀.		Al. °/₀	Si. °/₀.		
	2,5	5	7,5	10	5	10	3	3 à 4	6	8
Biermann	39,9	44,5	62,36	74,6	61,25	72,75	61,25	72,3	»	»
Cowles	25	33	39	46	16,3 à 26,3	31,3 à 51,3	34,5 à 46,5	»	36 à 56,3	55,6 à 95,6
Prix Cowles en mesures françaises. .	2f75	3,63	4,07	5,106	1,79 à 2,09	3,44 à 5,64	3,465 à 5,12	»	3,96 à 6,19	6,12 à 10,52

2° LAITON D'ALUMINIUM

Nous avons déjà donné quelques indications sur les laitons de MM. Cowles, lesquels s'obtiennent en fondant du bronze d'Al. avec du zinc, qui y est contenu dans des proportions de 25 à 33,3 p. 100, l'Al. y figurant pour $\frac{1}{3}$ à 1 p. 100. Le laiton le plus riche en zinc est aussi le plus résistant, mais s'allonge moins à la traction. Ce laiton approche aussi de la résistance du bronze d'aluminium.

Le laiton à 33 p. 100 contient précisément les proportions de zinc du laiton ordinaire et l'Al. qui y entre a visiblement pour effet de le rendre et plus raide et plus résistant.

Le laiton produit à Neuhausen a, d'après le tableau précédent, une résistance moindre : il y a lieu de supposer qu'il contient moins de zinc. Mais le laiton que j'ai vu fabriquer à Froges et celui qu'on fabrique actuellement à Neuhausen sont meilleurs.

Pour avoir un laiton homogène et sans soufflures, le mieux est d'ajouter Al. à du laiton ordinaire en fusion. Il est utile comme pour le laiton ordinaire de le refondre pour lui donner toutes ses qualités.

Cependant, à la suite de nombreuses expériences auxquelles j'ai assisté, je pense qu'un fondeur expérimenté peut se contenter d'opérer en première fusion.

J'ai vu forger cet alliage à chaud et j'ai pu constater qu'il se tient très bien sous le marteau; néanmoins il m'a paru moins facile à forger que le bronze; mais il est plus fusible et moins doux, et ces propriétés le rendent précieux pour certains usages industriels.

Il se lamine très bien et on en fait des enveloppes de torpilles ainsi que des hélices de navires; des pompes de navires et des gouvernails, des soupapes, des roues d'engrenages et toutes sortes d'engins hydrauliques; des tiroirs, des machines locomotives, des coussinets, etc. En raison de la facilité qu'il offre au laminage en même temps que de sa résistance à la corrosion, je crois qu'on pourrait s'en servir pour les chaudières à vapeur, d'autant plus que son allon-

gement à la rupture qui, d'après les expériences auxquelles j'ai assisté, va jusqu'à 49 p. 100, donnerait une grande sécurité pour cet usage.

Ce qu'il y a de particulièrement intéressant, c'est la faible proportion d'Al. nécessaire pour donner au laiton ces propriétés remarquables ; au point qu'on peut dire aujourd'hui que c'est le métal le moins cher eu égard aux usages auxquels il se prête et dans un grand nombre desquels il peut remplacer le bronze d'Al., tout en coûtant moins cher.

Plus fluide que le laiton ordinaire, sa coulée est aussi très brillante, tandis que l'autre se recouvre d'une crasse verdâtre à la surface.

Par sa résistance, il dépasse les autres alliages. Ainsi 1 p. 100 d'Al. qui augmente le prix du kilogramme de $0^{f},20$ seulement, fait dépasser au laiton la résistance du métal Delta qu'on a tant vanté dans ces derniers temps.

Le professeur Tetmajor a montré que le laiton à 40 p. 100 de zinc et 1,36 p. 100 Al. a une résistance à la rupture de 61 kilogrammes par millimètre carré et un allongement de 22,7 p. 100. Tandis qu'avec 33 p. 100 de zinc la résistance est de 30 kilogrammes et l'allongement de 60 p. 100 (Résultats de l'usine de Neuhausen).

Mais la différence de teneur en zinc se manifeste surtout pendant le forgeage.

Les laitons à 40 p. 100 de zinc se forgent au rouge sombre, quelle que soit leur teneur en Al. Ceux à 33 p. 100 se forgent à peine à cette température et à la condition de renfermer de 2 à 3 1/2 p. 100 d'Al. En diminuant la teneur en Al. on peut forger à des températures de plus en plus basses.

M. Kiliani vante beaucoup le laiton à 3 p. 100 pour son inoxydabilité, son bon marché, la facilité qu'il offre au rouge vif d'être forgé sous toutes formes, tandis qu'à froid il a la dureté du bronze phosphoreux et la résistance du meilleur acier.

Toutes ces qualités appartiennent incontestablement à divers laitons d'aluminium, mais nous considérons qu'il serait utile d'entreprendre des expériences méthodiques pour établir les qualités relatives des laitons à différente teneur, sur lesquelles il y a encore quelques divergences d'appréciation.

Rien n'est plus facile que de faire du laiton d'Al. à l'aide des éléments constituants; soit en employant le bronze d'Al. comme source d'Al. La coulée se fait avec les mêmes précautions que le bronze. J'ai cependant remarqué que dans les moulages en sable, les entonnoirs de coulée ont une plus grande dimension que pour le bronze. Par contre, il faut éviter ici le refroidissement brusque qui rend le métal cassant. C'est à cette pratique défectueuse que les laitons à teneur élevée obtenus à Froges doivent leur fragilité; il est probable qu'à l'heure qu'il est on a reconnu la nécessité de procéder par refroidissement d'autant plus lent que la teneur en Al. est plus élevée, ainsi qu'on l'avait déjà remarqué dans d'autres usines.

Sans entrer dans de nouveaux développements, nous ferons remarquer que le laiton d'Al. peut se substituer au bronze dans une foule d'emplois et qu'il paraît appelé à lui faire une concurrence redoutable à cause de son bas prix.

3° MAILLECHORT D'ALUMINIUM

Le maillechort ordinaire est un alliage de cuivre et de nickel, dans les proportions :

$$Cu = 90,$$

$$N = 10.$$

On y ajoute 1gr,66 d'Al. par kilogramme.

L'Al. est introduit dans l'alliage fondu des deux premiers métaux et on brasse vigoureusement le bain pour obtenir l'homogénéité.

L'inventeur de cet alliage est M. Thirion et le métal porte le nom de métal « Lechesne ». Je crois qu'il vaudrait mieux, pour le désigner, l'appeler « maillechort d'aluminium ».

Ce métal se prête admirablement à la ciselure et, en général, à tout le travail de l'or et de l'argent. Son emploi est donc limité aux objets d'art et d'ornementation.

4° ALLIAGES D'ARGENT ET D'ALUMINIUM

Les alliages connus ont les proportions suivantes :

$$Al.\ 93{,}5 \text{ à } 95,$$

$$Ag.\ 4\frac{3}{4} \text{ à } 5.$$

Ils ont en partie les propriétés de l'Al., mais leur dureté est plus grande.

Ils prennent un beau poli, sont inaltérables à l'air et ont à peu près la couleur de l'argent pur. Ils peuvent remplacer l'argent ou l'aluminum dont ils partagent les qualités.

Je pense qu'ils auront des applications étendues aussi bien pour les objets d'art que pour la vaisselle et les ustensiles de ménage de toute espèce. Inaltérabilité, aspect identique à peu près à celui de l'argent, avec un poids et un prix bien inférieurs, telles sont les qualités qui recommandent ces alliages pour des usages multiples.

On pourrait déjà, aux prix actuels, fabriquer la vaisselle plate aussi belle que celle d'argent, au quart du prix et au quart du poids!

Si cet usage s'étendait, il est probable que les procédés d'argenture de métal *jaune* ou de nickel auraient vécu.

5° FERRO-ALUMINIUM ET ACIER ALUMINEUX

Nous comprenons sous ce titre une foule de produits où le fer et l'aluminium sont alliés et qui ont, dès aujourd'hui, une grande importance.

Ces produits figuraient par des gueusets dans les différentes vitrines d'usines d'aluminium à l'Exposition universelle.

C'est à MM. Cowles qu'on doit l'impulsion considérable imprimée à la fabrication des alliages d'Al., aussi bien de cuivre que de fer, par la décomposition de l'alumine à l'aide du courant d'une machine dynamo-électrique dans leur usine de Lockport, près New-York.

L'addition d'une très faible quantité d'Al. au fer fondu (et nous comprenons sous ce vocable tous les fers plus ou moins carbonés) augmente sa fluidité. Cette propriété est très précieuse pour la coulée de grosses pièces et aussi pour celles, quelle que soit leur dimension, qui ont des détails très tourmentés ou délicats, lesquels ne viennent pas lorsque la fluidité est imparfaite. Pour l'acier, une proportion de 1 p. 100 Al. suffit.

Dans la coulée de grosses pièces, l'Al. a un autre avantage, c'est de faciliter l'écoulement des gaz CO ou CO^2 qui se produisent par la combustion du carbone combiné par l'oxygène des oxydes ferreux dont aucun acier ni aucune fonte ne sont complètement exempts.

Le métal ainsi obtenu est dépourvu de soufflures, ce qui n'arrive jamais aux grosses pièces d'acier, lorsqu'on ne comprime pas le métal fondu : or, l'on sait les difficultés que présente la compression de l'acier fondu.

L'aluminium intervient donc comme un véritable réducteur des oxydes.

L'origine de l'étude de l'aluminium dans les aciers remonte à Faraday.

Ce savant physicien avait trouvé 0,0128 à 0,0695 p. 100 d'Al. dans l'acier indien, appelé acier *Wootz*. Faraday obtint synthétiquement l'acier wootz en mélangeant à l'acier fondu un ferro-aluminium à 40 p. 100 Al. Il attribuait, d'ailleurs, le damassé de l'acier indien à la présence de l'aluminium.

Or, il est probable que le caractère damassé du produit ainsi obtenu fut l'effet du hasard, puisque des chimistes habiles et consciencieux comme Henry, Karsten, et Rommelsberg ne trouvèrent pas d'Al. dans le wootz.

Des proportions un peu fortes d'Al. rendent l'acier dur et cassant.

L. Grüner cite déjà en 1876 (voir *Annales des Mines*) deux exemples de fontes alumineuses dont il donne l'analyse.

1° Fonte de Löllen, en Carinthie, analysée par Richter, professeur de l'École des mines de Léoben. (Dans cette analyse, le fer a été calculé par différence.)

Fe	94,330
Mn	1,010
Al	0,565
Si	0,972
C	3,089
S	0,008
Ph	0,021
As	0,005
Total	100,000

2° Fonte de Champigneulles (pour les colonnes du théâtre neuf de Genève).

Al. . . . . 0,5 p. 100.

Billings cite un alliage de 0,52 p. 100 Al. et 0,2 de C se forgeant bien au rouge.

Rogers, un alliage de 0,8 p. 100 Al. qui ressemble au meilleur acier indien.

ALLIAGE « MITIS »

Sous ce nom, M. Ostberg (1) a présenté (M. Ostberg est Suédois) une série de produits remarquables, qu'il assure avoir obtenus en première fusion et qui réunissent la ductilité du fer le plus privé de carbone, c'est-à-dire le plus *doux*, avec la finesse et la dureté de la fonte la plus carburée et la plus cassante.

Si on prend du fer carburé, sans addition spéciale de fer non carburé, il se dégage du gaz en si grande abondance, au début de la fusion, que le métal en devient bulleux; et quelque élevé que soit son point de fusion, quelque forte que soit la température, lorsqu'on le coule il prend si vite qu'il ne peut être coulé en objets de dimensions un peu considérables. Cependant, si l'on ajoute 0,05 à 0,1 p. 100 d'Al., on peut obtenir les formes les plus déliées, et le métal garde néanmoins sa grande ductilité; ainsi s'exprime M. Ostberg.

M. Henri Howe (dans son grand ouvrage de la *Métallurgie de l'acier*) dit que des métallurgistes dignes de foi lui ont affirmé, d'un côté, qu'une légère addition d'Al. met obstacle au dégagement des gaz et, de l'autre, qu'elle rend le métal extrêmement fluide (2).

Cependant il paraît évident que des additions un peu fortes d'Al. rendent l'acier fondu plus pâteux; il y a là deux effets distincts entre lesquels il n'y a pas nécessairement connexité.

Quelle est la raison de ces effets?

M. Ostberg prétend que la présence de 0,05 à 0,1 p. 100 d'Al. abaisse le point de fusion de 300 à 500 degrés Fahrenheit (144 à 232 degrés C.) et explique par ce fait la finesse du métal fondu. De plus, l'Al. rendrait le métal si fluide que le gaz s'en échapperait emprisonné qu'il était *comme dans un filet* (sic).

M. Howe (*loc. cit.* et *Engineering and mining Journal*, t. XLIV) dit que l'affirmation de M. Ostberg est erronée. Il n'est pas prouvé, dit-il, que le procédé mitis abaisse le point de fusion, et il y a de bonnes raisons pour douter que l'Al. donne ce résultat.

Enfin une chute du point de fusion n'explique pas le phénomène.

Ses arguments sont les suivants :

1° Un accroissement de température explique le phénomène aussi bien que la chute du point de fusion (ou de solidification).

2° On ne trouve dans les écrits de Deville, Faraday, Calvert et Thomson, qui ont étudié les alliages ferro-alumineux, aucune indication sur cet abaissement du point de solidification, et on ne peut admettre que ce fait leur eût échappé.

3° Dans les analyses de fontes mitis par les meilleurs chimistes, on ne trouve pas d'Al.; ce que M. Ostberg ne nie point, d'ailleurs.

Les effets qu'il signale ont été produits même par une addition de 0,006 p. 100 d'Al.

En réalité, dans l'acier commun l'Al. existe en proportion qui varie de 0

(1) L'auteur du « mitis » est Nordenfelt, en 1885; les expériences d'Ostberg sont de 1886.

(2) C'est M. Ledebuhr, de Freiberg, qui paraît avoir le premier attaqué les conclusions d'Ostberg. Ses explications, cependant, ne paraissent pas satisfaisantes.

à 0,0034 p. 100 sans produire aucun effet notable. On ne peut croire qu'une addition à peine supérieure affecte tellement les propriétés du métal fondu.

4° L'Al., qui ne s'oxyde pas à basse température, s'oxyde réellement à une température élevée, et, dans l'espèce, il peut fort bien être oxydé par l'O des oxydes du métal fondu.

[Suivant H. Sainte-Claire Deville, l'Al. ne décompose pas les oxydes métalliques à chaud; un alliage d'Al. et de Cu donne de l'oxyde de cuivre au moufle. Mais aux environs du rouge vif Al. prend les propriétés du silicium et réduit les oxydes de Cu et Pb, donnant des aluminates.]

Si l'on n'a pas trouvé d'Al. dans le métal fondu, c'est qu'il n'y en avait point; il a sans doute été scorifié. Et, du moment où il n'y en avait point, il est absurde de dire qu'il a abaissé le point de solidification.

5° On prétend que l'abaissement du point de solidification concourt avec l'augmentation de fluidité pour permettre aux gaz de se dégager? Mais *Davenport* a refait l'expérience en ajoutant du ferro-nickel au moment de l'ébullition du métal, et celle-ci, de tumultueuse, est devenue calme.

On peut en conclure que le ferro-aluminium agit en rendant le métal capable de conserver les gaz qui, sans lui, auraient continué à se dégager.

L'explication de Davenport est que Al. se combine avec l'O de l'oxyde, la combinaison élevant la température.

La réaction est représentée par la formule suivante :



$$2Al. + 6FeO = 3FeO, Al^2O^3 + 3Fe.$$

La disparition de FeO met obstacle au dégagement des gaz et explique la tranquillité du bain.

Mais la combustion d'une petite quantité d'Al. est-elle suffisante pour expliquer l'accroissement de température qui a pour conséquence la fluidité?

M. Howe fait le calcul suivant : Supposons que la chaleur de combustion d'Al. (qui n'était pas exactement connue au moment où il a fait ce calcul) soit de 10.000 calories. La chaleur spécifique du fer à son point de fusion est environ 0,16 (puisqu'elle est égale à ce nombre entre 1200 et 1400 degrés). Si, comme Davenport, on ajoute 0,06 p. 100 Al., l'élévation de température produite sera :

$$\frac{10.000 \times 0.0006}{0,16} = 37°,5 \text{ centigrades.}$$

Dans une note postérieure, il corrige ce calcul à l'aide de renseignements déduits d'expériences de Thomson sur les composés de l'alumine. Voici comment on peut faire les calculs à l'aide de nombres exacts fournis depuis par Thomson même.

La chaleur de formation de Al^2O^3 est de 195,8 pour un poids équivalent de 78,4 (Voir l'*Annuaire du bureau des longitudes*). Al. entre dans ce nombre pour 27,4, le nombre de calories cherché est donc de

$$\frac{195,8 \times 1000}{27,4} = 7146,$$

puis

$$\frac{7146 \times 0,0006}{0,16} = 26°,8.$$

Donc, pour arriver à l'élévation de température dont parle Ostberg, il faudrait ajouter des quantités d'Al. beaucoup plus considérables qui, loin de rendre le métal fluide, l'épaissiraient.

D'autre part, la formation d'un aluminate de fer absorbe de la chaleur qui compense une partie du dégagement de chaleur produit par la combustion d'Al. En revanche Al., en arrêtant le dégagement de gaz, empêche une certaine perte de chaleur latente. Enfin, le rayonnement calorifique est un peu atténué par la cessation de l'ébullition.

Toutes ces causes, alternativement opposées, peuvent bien produire, sans que cela soit prouvé, un léger accroissement de température.

Donc, conclut M. Howe : 1° la théorie d'Ostberg est insoutenable; 2° celle de Davenport peut être vraie — sans qu'on puisse cependant soutenir qu'elle est probable — et peut rendre en partie compte des faits observés.

Telle est, en résumé, et un peu simplifiée, la doctrine ou plutôt la discussion de Howe.

Quoique la réduction de l'alumine, par les réducteurs usuels, l'hydrogène et le carbone, soit fort difficile, néanmoins Faraday et Billings l'ont effectuée par un grand excès de fer en présence du charbon; ceci explique la présence fréquente d'un peu d'Al. dans le fer fondu du commerce. Difficilement oxydable à une température basse, Al. se conduit, comme le silicium, aux températures élevées, et comme pour le silicium il en survit une partie à l'oxydation dans l'opération du raffinage.

Le chimiste A. Blair, qui a analysé beaucoup de fers et d'aciers au point de vue de l'Al., en a toujours trouvé en quantité très petite, au maximum de 0,032 p. 100; mais il n'a jamais constaté l'effet de cette présence sur les propriétés du métal.

Perry cite une analyse de fer fondu contenant 0,97 p. 100 Al., dont une partie était sans doute à l'état d'Al^2O^3 dans la scorie.

Karsten a fait les mêmes observations et a constaté que Al^2O^3, ajouté à la fonte de fer qui a été affinée au feu de bois, a été complètement scorifiée.

Ostberg objecte que l'addition d'Al. dans le fer de forge pur fondu, produisant les résultats qu'il a signalés, la théorie de Davenport se trouve en défaut.

Howe, tout en faisant ses réserves sur la doctrine de Davenport, dit que le raisonnement d'Ostberg est défectueux en ce sens que l'on peut admettre qu'il y a toujours oxydation partielle de fer pendant la fusion.

D'ailleurs, on ne peut admettre qu'une si légère addition d'Al. puisse à ce point bouleverser les propriétés du métal fondu. D'autant plus que si on fond du fer de forge pur, il n'en retient pas de traces; dans ce cas, l'éphémère addition de quelques millièmes au plus d'Al. ne peut pas laisser dans les molécules du fer une altération permanente.

Pour décider le point si l'addition d'Al. élève la température ou abaisse le point de fusion, il suffirait de faire deux expériences comparatives, l'une avec le mitis, l'autre avec le même poids de fer carburé et tiré du même lingot que celui qui a servi à faire le mitis et de comparer les températures du point de fusion.

C'est, en effet, la conclusion la plus sage et celle qui pouvait peut-être dispenser les différents auteurs dont nous avons cité les opinions de discuter aussi longuement une question que l'expérience seule peut élucider.

Si nous avons reproduit ces discussions c'est, d'une part, parce qu'elles ont eu un grand retentissement, et, de l'autre, parce qu'elles sont de nature à préciser certains points restés obscurs et sur lesquels les recherches pourront utilement porter.

Nous remarquerons enfin que la théorie de Howe repose presque entièrement sur certaines analyses chimiques, dont quelques-unes sont anciennes et datent d'une époque où on ne savait guère doser l'Al. avec précision. Ajoutons que ce dosage, lorsque ce métal est en faible proportion dans une masse de fer, est encore très délicat.

D'ailleurs, le vœu de M. Howe a été promptement exaucé et le professeur W. S. Keep a entrepris une série d'expériences qui sont précisément celles réclamées par Howe. Ces expériences sont consignées dans un mémoire lu à l'Association américaine pour l'avancement des sciences (1888).

M. Keep a eu pour collaborateurs deux chimistes, MM. Mabery et C. D. Vorce.

EXPÉRIENCES DE KEEP (1)

On a pris deux séries d'échantillons.

1re Série : fonte blanche (que Keep appelle fonte à carbone combiné).

°/o Si = 0,186 Ph = 0,263 S = 0,0307 Mn = 0,092

2e Série : fonte grise de Suède, marque F.L.M, contenant :

°/o Si = 1,249 Ph = 0,084 S = 0,04 M = 0,187.

Les barres servant d'éprouvette avaient $0^m,30$ de long et étaient fondues par paires; l'une avait une section carrée de $3^{cc},22$ de surface $\left(\frac{1}{2}\text{ pouce carré}\right)$ et sa compagne une section de $\frac{0,0083}{0,0254}$ $\left(\frac{1}{30}\text{ de pouce sur un pouce}\right)$.

On a mis 30 livres (anglaises) ($30^l = 13^{kg},6$), de la fonte dans un creuset en plombagine placé dans un fourneau soufflé à une pression de 2 onces, 25. (2 onces, 25 valent 70 grammes, l'auteur ne dit pas à quelle surface ce poids est rapporté; dans le cas où ce serait par pouce carré, ce serait une pression d'eau de 12 centimètres par centimètre carré).

Puis, après avoir fondu, on coula 5 livres ($5^l = 2^{kg},30$) soit 4 paires de barres. On y ajouta ensuite à la partie restée dans le creuset 4 livres ($4^l = 1^k,8$) du métal et assez de ferro-aluminium pour avoir la teneur voulue en Al., et ainsi de suite.

(1) M. Keep est ingénieur de la puissante compagnie américaine The Michigan Store, fonderie de poêles à combustion lente.

Pour connaître l'influence de Al., on répéta la série des fontes sans addition de ce métal.

Comme conséquence de ses expériences, M. Keep a été amené à examiner les propositions suivantes :

1° Consistance des fontes obtenues et question de la suppression des soufflures.

2° Persistance (ou non) de l'Al. dans le fer pour exercer une influence lorsqu'il et refondu.

3° Influence de l'Al. sur le grain ou le chargement de carbone combiné en graphite.

4° Perte de la trempe.

5° Epaisseur des croûtes sableuses.

6° Effet d'Al. sur la dureté.

7° Résistance à la traction.

8° Choc.

9° Élasticité.

10° Allongement permanent.

11° Effet sur le retrait de la fonte.

12° Fluidité du métal fondu.

1° Consistance des fontes obtenues et question de la suppression des soufflures.

Remarque. — Les nombres que je donne proviennent de la traduction que j'ai faite du mémoire de M. Keep, en anglais; ils présentent des divergences avec la traduction allemande dans « Stahl und Eisen » et avec la traduction française dans la *Revue universelle de Liège* (octobre 1889).

Les fontes blanches sont rarement résistantes. La résistance à la traction des fontes ordinaires est de 175 livres par $\frac{1}{2}$ pouce carré et sa résistance au choc est de 100 livres.

[L'auteur, qui est américain, ne dit pas quelle est son unité de poids; je présume qu'il a pris la livre anglaise qui est de 373^{gr},242].

Dans cette supposition les nombres précédents se transforment ainsi en mesure françaises :

A la traction.	20^{kg},253 par millimètre carré.
Au choc	11^{kg},6 —

Les très bonnes fontes de ce type résistent à 44 kilogrammes à la traction et une addition de $\frac{1}{30}$ p. 100 d'Al. porte cette résistance à 65^{kg},35 : c'est un accroissement de 44 p. 100; pour le choc il n'y a gain que de 6 p. 100.

Remarque. — Je dois ajouter que ce mémoire a été reproduit en allemand dans « Sthal und Eisen » et que le traducteur met 175 kilogrammes à la place de 175 livres sans même spécifier la section.

Il y aurait un avantage considérable pour la diffusion des documents scientifiques à ce que les auteurs prissent l'habitude de prendre toutes leurs unités de mesure dans le système métrique qui est actuellement adopté dans presque

toutes les nations ou, à défaut, prissent le soin de spécifier exactement de quelles mesures ils se servent : faute de quoi on est exposé à bien des erreurs où à des discussions stériles.

Cette fonte a un grain plus fin que celle qui a servi à l'expérience.

2° L'aluminium reste-t-il dans le fer ?

Pour répondre à cette question M. Keep a fait six expériences avec la fonte blanche. A la première épreuve il a ajouté $\frac{1}{4}$ p. 100 Al.; le grain s'est trouvé visiblement modifié; il est devenu plus fin et plus blanc. La résistance à la traction a augmenté de 20 p. 100 et au choc 7 p. 100 [M. Langhenhove (Mémoire cité) met 70 p. 100?]

La 2e épreuve a consisté à refondre le métal de la 1re en y ajoutant assez de fonte blanche pour réduire la teneur en Al. à $\frac{1}{15}$ p. 100. L'effet de l'Al. persiste malgré la diminution du pourcentage. Il continue à persister jusqu'à la 6e épreuve, quoique diminué, et l'auteur en conclut qu'il n'a pas été complètement éliminé.

Je ne voudrais pas contredire l'auteur, mais il me semble qu'une bonne analyse chimique de la 6e épreuve répondrait mieux à l'objection de Howe.

3° Effet d'Al. sur le grain et transformation du carbone combiné en graphite.

D'une manière générale lorsqu'une fonte blanche est fondue tout le carbone combiné qu'elle contient reste dissous. Si elle est saturée à chaud, elle abandonne du carbone en se refroidissant. Ce carbone prend la forme de graphite mais il reste emprisonné dans le fer. L'avantage de l'addition de Al. est précisément d'éviter que le C. libéré au moment de la cristallisation, se mette en géode dans les soufflures et de le laisser, au contraire, réparti d'une manière homogène dans la masse. Aucun autre corps ne produit ce résultat au même degré.

Non seulement Al. change la fonte blanche en grise, mais il change encore le véritable caractère du métal.

La séparation du C. paraît être instantanée au moment de la cristallisation, et pour cette raison la durée de la coulée a peu d'importance.

En fait, il semble que la plus grande rapidité de la coulée correspond à une plus grande quantité de graphite et que les fontes minces sont aussi grises que celles plus épaisses.

Le type de fonte blanche contenant peu de silicium donne un liquide sans bulles; une addition de $\frac{1}{4}$ p. 100 d'Al. ne donne pas encore une fonte homogène; mais le ton est devenu foncé et le grain fait voir du C. à l'état de graphite.

L'effet est plus visible sur les barres minces que sur les barres grosses; ce qui fait voir que l'effet est instantané et que la durée de la coulée n'y fait rien.

Après la 3e addition d'Al., la fonte est grise sans trace de blanc pour les barres minces comme pour les grosses.

L'essai d'éprouvettes grises, contenant 1,2 de Si., nous montre que Al. et Si. agissent dans le même sens et qu'une légère addition d'Al. enlève toute blancheur à la fonte, et donne le même grain aux barres minces et grosses.

L'effet augmente en même temps que la dose d'Al., au moins jusqu'à 4 p. 100, limite des expériences de M. Keep; les fontes deviennent de plus en plus grises et plus douces.

4° **Perte de la trempe.**

Si la fonte est coulée subitement, le C. combiné au moment de la fusion n'a pas le temps de se séparer et y reste incorporé; la fonte est alors dite trempée. La trempe est utile, lorsqu'on requiert des surfaces dures, l'intérieur étant une fonte douce et tenace, comme pour les essieux de voiture.

Mais, en général, la trempe est l'écueil que le fondeur cherche à éviter.

Ce qui cause la trempe, c'est le refroidissement brusque de la surface qui, par conductibilité, refroidit l'intérieur et précipite le carbone à l'état de graphite dans le noyau.

L'Al. évite la trempe en maintenant longtemps la fonte fluide.

5° **Epaisseur des croûtes sableuses.**

Pour empêcher le rôtissage (scorification partielle) du sable du moule par le métal fondu, on le badigeonne de graphite. Or, comme Al. a pour effet de mettre du graphite de la fonte en liberté, ce graphite isole la fonte du moule et abrite le sable de la chaleur. Et dès lors la fonte ne prendra pas de croûte sableuse et la surface ressemblera à l'intérieur.

Cette propriété sera fort appréciée des fondeurs.

6° **Dureté.**

Lorsque, dans un fer carboné le C. est à l'état de graphite, les grains de fer sont comme emprisonnés dans les mailles du graphite, extrêmement petites d'ailleurs, et un instrument tranchant peut avoir la chance de rencontrer le graphite et de faire facilement une entaille. On dit alors que le métal est doux. L'Al. donnant à la fonte un grain moins grossier la rend plus facile à couper, c'est-à-dire que la fonte est devenue plus douce.

7° **Résistance à la traction.**

Cette résistance est augmentée comme on le sait déjà, par l'addition d'Al. M. Kepp dit qu'elle est due en partie à la résistance propre de l'Al., mais sans doute surtout à l'homogénéité qu'il a donné au métal.

Remarqne. — M. Keep ne dit point sur quoi il base sa première raison; on ne voit pas bien en effet comment la résistance propre d'une si petite proportion d'Al. peut intervenir.

8° Résistance au choc.

L'amélioration due à l'Al. est bien plus grande pour les fontes blanches que pour les fontes grises.

L'explication de ce fait est que si l'on fond de la fonte blanche seule, elle devient plus poreuse à chaque fusion; au point qu'à la huitième fusion elle ne résiste plus qu'à 68 livres par pouce carré (soit environ 4 kilogrammes par centimètre carré). Dès lors l'amélioration par l'Al. a un bien plus grand effet sur une fonte blanche, que sur une fonte qui est déjà presque homogène et naturellement tenace.

Ce n'est pas la résistance propre du graphite qui agit, mais la résistance étant répartie uniformément, ce qui est l'effet de l'Al. sur les fontes blanches, il n'y a plus de soufflures et, par suite, plus de ruptures anormales à craindre.

9° Élasticité.

Cette question a été traitée dans les deux numéros qui précèdent; on a vu que la résistance est augmentée par Al. et que le métal est devenu moins cassant.

10° Allongement permanent.

L'homogénéité étant accrue, on comprend que l'allongement permanent soit diminué, ce que l'expérience a vérifié.

11° Retrait de la fonte.

Quand le C. passe de l'état combiné au graphite, au moment de la cristallisation par un refroidissement brusque, le volume augmente. Lors donc que la fonte se refroidit, elle se contractera d'autant moins qu'il y restera moins de carbone combiné.

Ainsi les fontes blanches, les plus riches en carbone combiné, se contractent de 1/4 jusqu'à 1/3 de pouce par pied (un pied contenant 12 pouces la contraction est de 1/48 à 1/36 [M. Langenhove dit 1/55 à 1/38]), tandis que les fontes épaisses ne se contractent que de 1/10 de pouce linéaire (soit 1/120).

L'Al. augmentant la quantité de graphite, réduit donc la contraction, ce qui est un avantage pour le moulage.

Dès la troisième fusion l'effet est sensible : l'effet paraît plus marqué sur les barres minces.

Si on commence l'opération avec un creuset neuf, l'effet apparaît plus vite, le silicium fourni par les parois agissant dans le même sens que l'Al.

Mais les premières expériences faites ne sont pas encore suffisantes pour établir une loi générale.

12° Fluidité.

Les expériences sur les barres de la série blanche (presque dépourvues de Si.) montrent nettement l'accroissement de la fluidité due à l'Al. Dans les éprouvettes à base grise, la combinaison de Al. avec Si. paraît réduire la fluidité; cependant, dans les dernières éprouvettes, la fluidité est accrue à un degré très marqué.

Les alliages d'Al. et de fer appelés ferro-aluminium doivent être fabriqués à l'aide de métaux purs.

Ils n'ont pas, jusqu'ici, d'emploi immédiat; mais ils sont utilisés pour faire pénétrer Al. dans les fers, fontes ou aciers dans la proportion de 1 à 2 pour 100.

Si on jetait cette faible quantité dans un bain de fer plus ou moins carburé, fondu, une partie se volatiliserait et l'autre partie s'allierait dans les régions superficielles. On n'aurait même pas un alliage homogène en remuant la masse par un procédé quelconque. Tandis que le ferro-aluminium moins volatil, moins fusible et plus doux, se mélange mieux.

Non seulement tout n'est pas dit sur ces alliages, mais il paraît certain que leur incorporation dans le fer fondu n'a pas encore été l'objet d'expériences méthodiques, suffisamment prolongées.

Un vaste champ est ouvert aux conjectures, mais, il est bon de le dire, aussi aux espérances consolidées par des succès partiels très réels : le reste est affaire d'expérimetation, de pratique.

Les différentes maisons qui ont exposé au Champ de Mars, présentaient des gueusets de ferro-aluminium, où l'Al. entrait dans des proportions de 10 à 20 pour 100.

Les alliages obtenus avec le fer et l'acier ont, d'après l' « Aluminium Company » et l' « Alliance », des résistances de 48 à 66 kilogrammes par millimètre carré.

On ne m'a pas donné les nombres relatifs au fil d'acier alumineux; il est probable qu'on arrive à des résistances de 90 kilogrammes lorsque les métaux alliés sont purs.

M. William J. Spencer a fait en 1887 des essais et analyses des résultats obtenus par l'addition d'aluminium dans les moulages d'acier. Ces essais sont publiés dans le mémoire précité de la *Revue universelle de Liège*. Mais l'auteur fait remarquer qu'ils sont faussés par la présence de 1,05 de cuivre dans l'acier. Cette remarque suffit à expliquer les différences de résistance entre les produits expérimentés par M. Spencer et les autres que nous avons cités dans le cours de ce mémoire.

On constate dans le mémoire de M. Langhenhove que la plus faible addition d'Al. dans une coulée d'acier Bessemer fait disparaître les gerbes d'étincelles qui s'en dégagent habituellement et que la surface du lingot refroidi se trouve concave, au lieu de convexe, preuve d'un tassement extraordinaire du métal.

L'Al. ne communique pas seulement cette propriété au fer. J'ai vu des moulages de laiton contenant 1 p. 100 d'Al. (à l'usine de Froges) et le métal refroidi présentait dans les évents des concavités extraordinaires, alors qu'au moment

FABRICATION INDUSTRIELLE DE L'ALUMINIUM

ET DE SES ALLIAGES

OBSERVATIONS GÉNÉRALES

La métallurgie de l'aluminium comprend actuellement deux méthodes principales : l'une chimique, l'autre électrique.

La méthode chimique comprend plusieurs procédés, qui, tous, dérivent plus ou moins de la méthode classique de H. Sainte-Claire Deville, à qui appartient, sans contestation possible, la gloire d'avoir inauguré la fabrication industrielle de l'aluminium.

La méthode électrique comprend également plusieurs procédés plus ou moins analogues basés sur la décomposition de l'alumine ou d'un composé alumineux par l'arc électrique qui jaillit entre les deux électrodes d'un courant interrompu fourni par une machine dynamo-électrique.

Les procédés chimiques, où la dépense de charbon est considérable, exigent l'établissement de l'usine à proximité d'une mine de houille; les procédés électro-dynamiques sont installés avec avantage dans le voisinage de puissantes chutes d'eau qui donnent la force motrice.

Il est impossible de dire *a priori* s'il est plus avantageux d'emprunter la force motrice à une chute d'eau ou à une chaudière à vapeur, l'usine étant installée dans le voisinage de houillères.

Il règne à cet égard certains préjugés parmi des industriels qu'une étude raisonnée de la question peut rapidement dissiper.

Ce qu'il y a de commun, dans l'un et l'autre cas, c'est la dépense d'installation de l'usine et des moteurs électriques, ainsi que des fourneaux de fabrication. Ce qui fait la différence, c'est : pour les usines hydrauliques, la dépense d'établissement du barrage de la prise d'eau, s'il y a lieu, ou la construction de réservoirs ; celle des conduites d'eau depuis le déversoir principal — ou la tête

d'eau — jusqu'au récepteur hydraulique, qui est nécessairement placé à proximité de la machine électrique ; d'une part pour rendre l'eau au point le plus bas possible, emmagasinant ainsi le maximum du travail moteur, et de l'autre pour réduire à leur minimum les pertes de travail moteur par les résistances dues aux transmissions ; enfin, le prix d'acquisition du ou des récepteurs hydrauliques.

C'est, pour l'usine à vapeur, l'acquisition et l'installation des chaudières et des machines motrices.

Dans le premier cas, la dépense est l'intérêt et l'amortissement de l'installation telle que nous venons de la décrire ; dans le second elle se compose, d'une part, des dépenses d'installation des chaudières et des machines motrices, et de l'autre du charbon. Ce sont ces deux sources de dépenses qu'il faut comparer, et il n'y a pas de doute qu'elles soient très différentes selon les cas.

Il faut, pour faire une comparaison exacte, ajouter au second cas les dépenses de main-d'œuvre relatives au ou aux chauffeurs des chaudières, un seul individu pouvant suffire à la conduite du récepteur dans l'un et l'autre cas. Cette dépense, égale des deux côtés, peut donc être négligée.

On sait quelle est la force motrice nécessaire pour une production journalière de tant de kilogrammes de métal. On en déduit immédiatement la quantité approximative du charbon qu'on brûlera par jour, et aussi, approximativement, la dépense des récepteurs et des chaudières.

On choisira la mine près de laquelle on veut s'établir d'après le prix du charbon principalement, et aussi d'après d'autres considérations accessoires. Avec tous ces éléments réunis, on peut, avant de faire un projet, chiffrer la dépense annuelle pour une production d'Al. ou d'alliages déterminée d'avance.

Il est plus difficile d'évaluer, même à une approximation éloignée, le coût d'une installation hydraulique. Tout dépend du choix de lieu où se fera la prise d'eau et aussi de celui où l'usine pourra être construite ; cette usine devant être aussi près que possible de la prise d'eau pour éviter une dépense excessive de conduites et aussi, comme conséquences, de perte de charge d'eau. D'ordinaire, on choisira un cours d'eau pouvant donner un grand excès de force motrice, afin de faire abstraction des pertes de charge.

Les machines dynamo ayant une grande vitesse de rotation, il sera préférable, pour éviter un excès d'engrenages ou de connexion d'engrenages de trop grande différence de rayon, d'adopter une turbine rapide, c'est-à-dire débitant le travail moteur qu'on doit fournir sous une forte pression. On s'installera donc sur une grande chute, soit en montagne, soit au pied d'une de ces chutes exceptionnelles comme en offrent certains grands cours d'eau ; ainsi, par exemple, la chute du Rhin à Schaffouse, où la Société suisse d'aluminium a, en effet, installé son usine. Mais ce dernier cas n'est pas fréquent.

On s'installera donc généralement en montagne.

La suite de ce travail nous permettra de juger certaines installations existantes d'après les principes que nous venons d'émettre, et nous commencerons immédiatement par la description des procédés en usage.

1° MÉTHODE CHIMIQUE

Rappelons d'abord sommairement le procédé de Sainte-Claire Deville, d'où dérivent les méthodes chimiques actuelles.

On chauffe ensemble de la bauxite (alumine hydratée naturelle) en poudre avec du carbonate de soude. Il se forme ainsi de l'aluminate de soude, que l'on dissout par l'eau; on fait passer dans la dissolution un courant d'acide carbonique, qui précipite l'alumine à l'état d'hydrate. Cette alumine est mélangée avec du sel marin et du charbon; on porte le mélange dans une cornue dans laquelle on fait passer un courant de chlore, et on obtient ainsi du chlorure double d'aluminium et de sodium. Enfin, le chlorure double est décomposé par le sodium métallique, dans un fourneau à réverbère en y mélangeant de la cryolithe du Groënland (fluorure double d'Al. et de Na.) comme fondant.

Le sodium a été produit par la réaction du charbon au rouge sur la soude caustique.

M. Weldon a fait remarquer à cet égard que la soude n'est pas directement réduite par le charbon, mais que celui-ci décompose le carbonate et que la soude étant volatilisée, se dissocie à haute température, l'oxygène se combinant avec le charbon et laissant le sodium libre.

Mon opinion est que cette remarque n'ajoute rien à nos connaissances; il est certain que le phénomène de dissociation — qui n'a plus besoin d'être expliqué — juxtapose les éléments Na, O, C à l'état gazeux et que, dès lors, la masse considérable de charbon incandescent, avide d'oxygène, s'empare de celui du sodium.

En 1882, M. Webster a apporté un perfectionnement à ce procédé en tirant l'alumine de l'alun ordinaire.

On chauffe ce corps mélangé à de la poix; puis on dissout dans l'acide chlorhydrique, qui décompose le sulfure qui s'est formé. On mélange le résidu avec du charbon de bois pilé dans une cornue en faisant accéder l'air mélangé de vapeur d'eau. Après lixiviation, le résidu donne de l'alumine et du sulfate de potasse; ce dernier produit, qui est un accessoire de l'opération principale, doit couvrir la moitié des frais.

Le procédé Deville fontionne depuis 1858 à l'usine de Salindres; on est arrivé ainsi à une production annuelle de 2.400 kilogrammes vendu 120 à 150 francs le kilogramme, et, il y a peu de temps, j'ai pu m'assurer que Salindres vendait encore le kilogramme d'Al. au prix de 100 francs à des clients habitués à payer ce prix et peu au courant, sans doute, des progrès récents de la fabrication de ce métal.

En 1883, le bruit se répandit dans les journaux qu'à Holywod, près de Birmingham, on était à produire la tonne d'Al. à raison de 2.500 francs, ce bruit était certainement erroné. Mais, peu d'années après, en 1887, un chimiste américain, Castner, prit un brevet pour la fabrication économique du sodium, du

magnésium et de l'aluminium et le porta à l'*Aluminium Company*, dont on a vu l'exposition au Champ de Mars.

(Ce procédé a été décrit dans l'*Engineering and mining Journal*, de New-York, dans les *Mémoires* de H. Pembertan et du professeur Hanford-Henderson, dans le *Journal Francklin, Inst.*, (t. CXV, p. 469), et dans l'*Iron adge*, en 1888, dans un article relatif à l'usine de l'*Aluminium Company*, à Oldham).

Le brevet Castner est presque contemporain du brevet Cowles (procédé électrique). Cependant le premier brevet Cowles date de 1885 et a été d'abord appliqué à Cleveland (Ohio).

Procédé Castner.

La différence principale entre le procédé Castner et le procédé Deville, dont il dérive, consiste essentiellement dans l'abaissement de la température de réduction, de 1.500 à 800 degrés.

Cette circonstance permet d'employer des vases en acier de dimensions relativement grandes, si on les compare aux tubes en fer forgé et à paroi épaisse de Sainte-Claire Deville.

En outre, l'usure de l'outillage est moindre, et cet effet est dû, pour la plus grande partie, à l'abaissement de la température.

Depuis son premier brevet, Castner a plusieurs fois modifié et amélioré la fabrication du sodium et de l'aluminium purs. La principale modification consiste dans le chargement des creusets à chaud, ce qui permet l'emploi de creusets plus grands et une plus grande production dans un temps donné. En outre, ils sont chargés maintenant avec un mélange de matières préalablement fondues, au lieu qu'auparavant on les chargeait à froid en fragments.

La conséquence de toutes ces améliorations a été un abaissement du prix de 4,5 à 5 sch., — soit 5f,50 à 5f,75 — à 2f,50 ou même 2 francs le kilogramme.

Je ne donne, d'ailleurs, ces chiffres que sous toutes réserves, les différentes publications qui donnent la description du procédé Castner, étant loin d'être d'accord sur ce prix de revient. Je crois, jusqu'à plus ample informé, que le prix de 3 à 4 francs par kilogramme est celui qui se rapproche le plus de la vérité.

De même, l'aluminium a baissé de 50 à 20 sch. la livre (on ne spécifie pas si c'est la livre troy anglaise ou le demi-kilogramme). En livres anglaises, le prix revient de 57f,50, prix ancien, à 23 francs, prix actuel. Ajoutons que le prix de vente du kilogramme d'Al. sur la place de Paris, qui était encore de 60 francs au moment de la rédaction de mon premier mémoire, en décembre 1889, est actuellement de 20 à 30 francs. Mais il est à prévoir, en présence de la construction nouvelle d'usines et de la production croissante d'Al., que le prix du kilogramme est appelé à baisser très rapidement d'ici peu de temps. C'est alors que se fera, naturellement, l'élimination des produits dont le prix de revient se trouvera trop élevé.

La fabrication d'Al. par le procédé Castner comprend trois opérations principales préalables :

1° Fabrication du charbon ferreux ou carbide de fer, FeC^2;

2° Fabrication du sodium métallique;

3° Fabrication du chlorure double d'aluminium et du sodium.

Le chlorure double est ensuite décomposé par le Na et donne Al. métallique.

Le carbide de fer s'obtient en mélangeant du fer en limaille avec du brai; on obtient, en le chauffant, une sorte de coke qui est le réducteur de la soude caustique.

La réduction se fait, à l'usine d'Oldham, dans une batterie de 20 fourneaux placés sur deux rangs; la chaleur est produite par des gazogènes système Wilson (1).

La soude caustique et le carbide de fer sont mélangés, puis chauffés à 800 degrés dans de grands creusets ayant $0^m,46$ de diamètre et $0^m,61$ de hauteur; chacun contient 36 kilogrammes de matières.

Le sodium distille dans de petits condenseurs en fer.

Les proportions sont les suivantes : 6 parties de soude donnent 1 partie de sodium et 5 de carbonate de soude, tandis qu'il faut 3 parties de sodium et 10 parties de Cl pour produire 1 partie d'Al.; il faut donc 18 parties de soude pour 1 partie d'Al.

Le résidu de la préparation du sodium contenant 80 p. 100 de carbonate et 20 p. 100 de fer métallique est lessivé dans un appareil spécial et le carbonate soluble est enlevé à l'aide d'une pompe.

Il est revendu à la Société A. Chance et Cie, dont l'usine est contiguë et à laquelle on achète la soude caustique et l'acide chlorhydrique.

Le sodium recueilli dans les condenseurs est mis dans des pots en fer bien secs et conservé dans l'huile pour empêcher l'oxydation; il est réemployé pour les opérations ultérieures.

Pour la fabrication du chlorore double il y a 12 fourneaux à chaleur régénérée; chacun de ces fourneaux a pour côtés 5,7 et 10 mètres. Chaque fourneau contient 5 cornues; il y en a donc 60 en tout.

La production journalière est d'environ 6.000 livres, d'après l'*Engineering*, et 2.720 kilogrammes d'après Kosmann, de Breslau.

Le chlorure double contient 12 p. 100 environ d'Al. et en rend à peu près 10 p. 100. Les chiffres exacts sont les suivants :

36 kilogrammes de chlorure double,
$11^{kg},79$ de Na et
$13^{kg},6$ de cryolithe
donnent 3,63 d'Al.

D'après le chiffre de M. Kossmann, on obtiendrait ainsi 275 kilogrammes environ par jour, soit 82 tonnes par 300 jours ouvrés. Cependant, le représentant de la maison à l'Exposition ne certifiait que 50 tonnes par an.

Il est certain qu'il y a d'autant plus d'incertitude dans ces chiffres, que l'on

(1) L'usine de l'Aluminium company, qui exploite le procédé Castner, est située à Oldham, station à Olburry, près Birmingham, chemin de fer du Great Western.

est à peine sorti de la période des essais, et qu'on n'a pas encore atteint ce que l'on peut appeler une production normale.

Reprenons la description du procédé de fabrication du chlorure double.

Les fourneaux sont chargés avec un mélange d'alumine, de sel marin et de charbon que l'on chauffe pendant une heure environ. Lorsque la température voulue est acquise, on fait arriver un courant de chlore dosé par le passage à travers les valves d'un compteur : l'opération dure deux jours et on consomme 75 kilogrammes de Cl. environ par fourneau. Le chlorure double distille d'une façon continue dans des condenseurs où il cristallise.

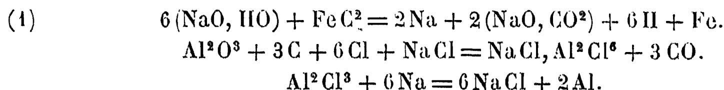
Le chlore est produit dans des appareils Weldon qu'on dit fort perfectionnés.

On emploie encore à Oldburry un autre procédé qui consiste à faire agir simultanément dans un fourneau 25 p. de sodium, 80 de chlorure double et 30 de cryolithe qui sert de fondant. Le chargement des matières se fait à l'aide d'une trémie placée au haut du fourneau qui est chauffé au gaz à 1.000 degrés.

Au bout d'une heure et quart on fait couler les scories d'abord, l'Al. ensuite. Le métal Al. est un bloc et on le détache de la gangue qui l'enveloppe à coups de marteau. La production par coulée est de 3 kilogrammes environ.

Ces deux systèmes ont été expérimentés parallèlement, afin de déterminer lequel est le meilleur.

On peut représenter les réactions chimiques sur lesquelles est basé ce procédé par les formules suivantes :

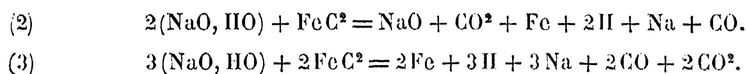


(1) $$6(NaO, HO) + FeC^2 = 2Na + 2(NaO, CO^2) + 6H + Fe.$$

$$Al^2O^3 + 3C + 6Cl + NaCl = NaCl, Al^2Cl^6 + 3CO.$$

$$Al^2Cl^3 + 6Na = 6NaCl + 2Al.$$

A la formule (1) on peut substituer une des deux suivantes :



(2) $$2(NaO, HO) + FeC^2 = NaO + CO^2 + Fe + 2H + Na + CO.$$

(3) $$3(NaO, HO) + 2FeC^2 = 2Fe + 3H + 3Na + 2CO + 2CO^2.$$

Il est certain que la formule (3) ne se réalise jamais, puisqu'une partie de la soude se transforme toujours en carbonate de soude; mais on peut alors l'écrire sous la forme :



(3') $$3(NaO, HO) + 2FeC^2 = 2Fe + 3H + 2Na + NaO, CO^2 + 2CO^2.$$

Le résidu est, en effet, un mélange de fer et de carbonate de soude. La formule (3') est évidemment plus favorable à une production économique du sodium que la formule (1); c'est donc de celle-là qu'il faudra se rapprocher. En fait, il est tout à fait probable qu'il se forme toujours un mélange de soude, de carboxyde de sodium et de carbonate de soude. Le carboxyde est un produit intermédiaire dont la réaction sur la soude donne du sodium et de l'acide carbonique,



$$NaO + CO^2 + NaCO = 2Na + 2(CO^2).$$

La liqueur alcaline que l'on obtient par lixiviation du résidu sert aux opérations ultérieures, ainsi que le fer qui reste insoluble.

Nous pouvons faire cette remarque, que le procédé Castner de la fabrication du sodium, peut s'appliquer identiquement à la production du potassium qu'on poura livrer au même prix, tandis qu'il s'est vendu jusqu'ici 200 francs le kilogramme.

Remarque I. — Nous avons dit plus haut que l'aluminium produit directement contient 1 à 2, quelquefois 2,5 p. 100 d'impuretés, presque exclusivement composées de silice et d'un peu d'oxyde de fer. On le purifie par des refontes successives : deux refontes suffisent d'ordinaire.

Le chlorure double du commerce qui est jaunâtre contient jusqu'à 4 p. 100 d'oxyde de fer; celui de « l'Aluminium Company », dont il existait des échantillons à l'Exposition universelle est blanc et ne contient plus que 0,005 d'oxyde ferreux; cette circonstance a influé sur la pureté de l'Al. produit, et c'est pour cette raison qu'on obtient dans cette usine un métal à 98 et même 99 p. 100 de teneur en Al. chimiquement pur.

La principale impureté est du silicium qui provient des creusets : la silice est réduite et Si. forme un alliage avec l'aluminium.

Remarque II. — « L'Aluminium Company » a été fondée en 1883 pour exploiter d'abord les brevets Webster, à Birmingham, Scheffield et Londres; elle y a ajouté le brevet Castner qu'elle exploite à Oldham.

Détails économiques. — On a vu plus haut que, d'après Kosmann, l'usine d'Oldham produit 2.720 kilogrammes de chlorure double par jour.

D'après le *Journal of the Society of chemical industry*, la production peut atteindre 3.000 kilogrammes de chlorure double; les proportions de chlorure double, de sodium et de cryolithe sont à peu près les mêmes que celles que nous avons indiquées (page 46). Le rendement en Al. est indiqué comme étant le $\frac{1}{10}$ du chlorure double.

D'après M. Anderson (*Annales de chimie*, 1889, p. 457), la production serait de 1.500 kilogrammes par semaine; soit par an ou cinquante-deux semaines 79 tonnes, nombre qui diffère très peu de celui de 82 tonnes, que nous avons calculé d'après les indications de Kossmann et en supposant qu'il y ait 300 jours ouvrables par an.

Le rédacteur de l'*Engineering de New-York*, rendant compte de l'exposition de l'aluminium au Champ de Mars, critique les exposants de n'avoir pas produit à côté de leurs échantillons les éléments de leur prix de revient. Il expose alors le résumé des opérations et arrive à une dépense de 263 tonnes de charbon par 1.000 kilogrammes d'aluminium.

Ce prix de revient a également été établi par M. Anderson (article précité), et, comme il n'y a pas dans le détail de grandes différences avec les calculs de l'*Engineering*, je me borne à reproduire ceux de W. Anderson.

Pour produire une tonne d'aluminium il faut :

Na	2.800 kilogrammes.
Chlorure double $2(NaCl) Al^2 Cl^6$	10.200 —
Cryolithe	3.700 —
Charbon (brûlé au foyer)	8 tonnes.

La fabrication de 2.870 kilogrammes de Na exige :

Soude caustique	20.000 kilogrammes.
Carbure de fer. { 5.460 kilog. de goudron. 460 kilog. de limaille de fer. }	3.200 —
Creuset en acier	$2^t,5$
Charbon brûlé au foyer	75 tonnes.

10.200 kilogrammes de chlorure double exigent :

Sel marin	3.700 kilogrammes.
Alumine	5.000 —
Chlore	7.000 —
Charbon	180 tonnes.

Le chlore est préparé par le procédé Weldon; 7.000 kilogrammes exigent :

HCl	82 tonnes.
CaO, CO^2	7 —
CaO	14 —
MnO^2	460 —

Si on applique à ces qualités les prix du commerce et qu'on y ajoute les frais généraux et la main-d'œuvre, on aura le prix de revient de l'aluminium.

Procédé Netto.

Ce procédé est appliqué par la Société « The Alliance », dont l'usine est à Walsend-on-Tyne, près Newcastle.

La fabrication comprend deux opérations principales :

1° La fabrication du sodium par la soude et le charbon (procédé du professeur Netto, de Dresde);

2° La fabrication de l'Al. par l'action du sodium sur la cryolithe, fluorure double de sodium et d'aluminium qu'on peut faire venir du Groënland.

Le procédé Netto permet d'obtenir de grandes quantités de Na à l'état de pureté parfaite : on m'a assuré qu'il revient à $4^f,50$ le kilogramme.

La cryolithe se tire du Groënland et revient à 625 francs la tonne. Ce prix élevé tient au prix des frais de transport, en grande partie, mais principalement au monopole que les américains ont établi sur les gisements du Groënland. C'est pourquoi la Société « l'Alliance » se préoccupe de la fabrication artificielle de la cryolithe et elle espère aboutir sous peu.

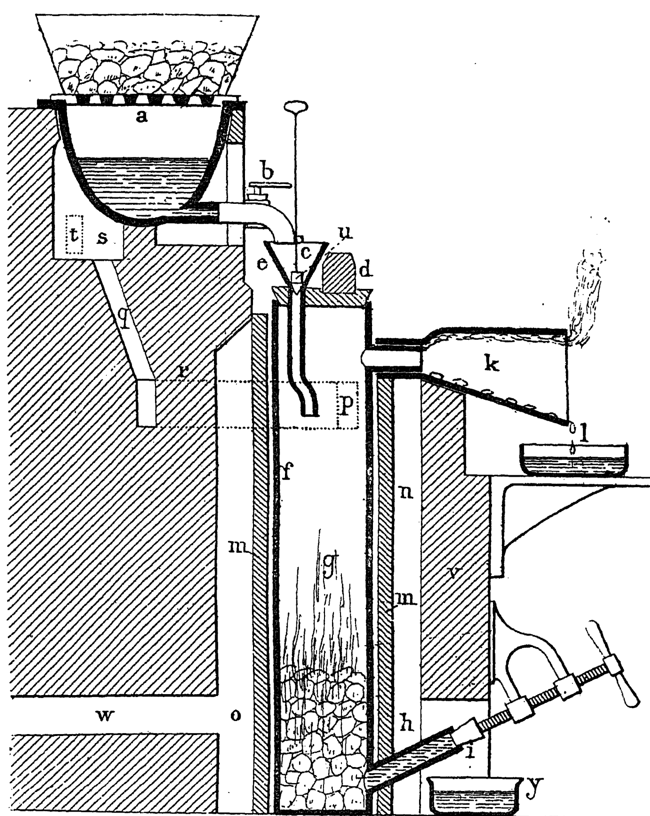


Fig. 1.

LÉGENDE

a Réservoir de fusion de NaO,HO.
b Robinet régulateur.
c Entonnoir pour l'écoulement de NaO,HO.
e Couvercle.
f Cornue de réduction de la soude.
h Tube de coulée.
i Bouchon conique de fermeture.
k Récipient de condensation du Na.
l Réservoir d'huile.
m Enveloppe en argile de la cornue.
w Rampant pour les gaz de la combustion.
p r q Carnaux qui conduisent ces gaz dans la chambre *s* de la soude.
t Orifice d'échappement de ces gaz.
u Bouchon de l'entonnoir *c*.
y Réservoir pour le carbonate en fusion qui s'écoule par *i*.
v Tuyères.

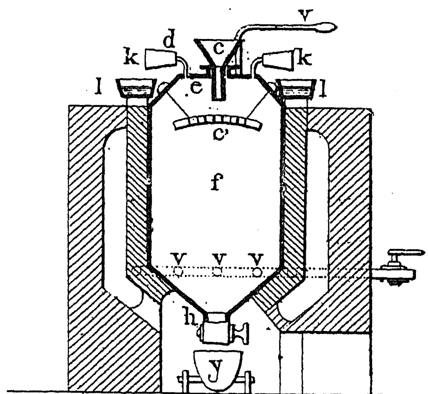


Fig. 2.

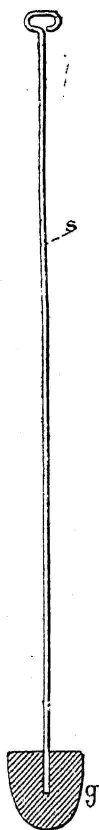


Fig. 1.

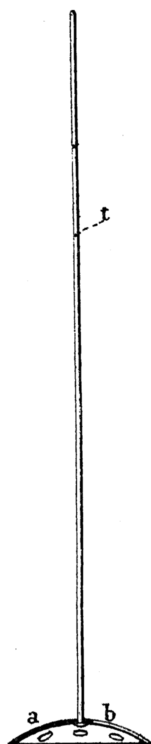


Fig. 2.

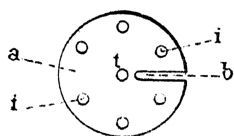


Fig. 3.

Coupe verticale.

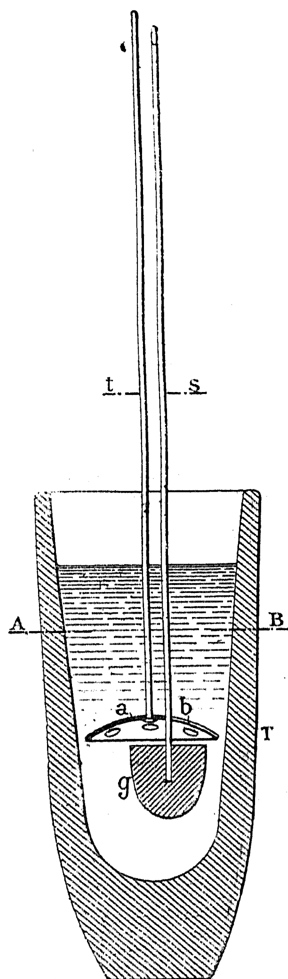


Fig. 4.

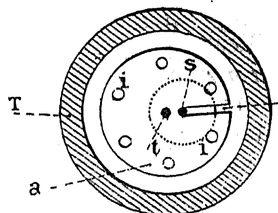


Fig. 5.

Section par A. B.

LÉGENDE

T Creuset de fusion.

g Bloc de sodium embroché dans une barre *s*.

a Disque porté par la tige *t*.

i Trous par où s'échappent les vapeurs de sodium.

1° Production du sodium.

Le procédé Netto a en vue de limiter autant que possible la production de carbonate de soude et de faire la réaction à une température assez basse pour permettre l'emploi de cornues en fonte; enfin, d'opérer la séparation immédiate du sodium produit d'avec le carbonate en formation.

A cet effet, les matières arrivent graduellement et, la décomposition étant instantanée, la fabrication est continue.

Les vapeurs de sodium se produisant à la suite de la chute de la soude sur le charbon incandescent s'échappent au fur et à mesure de leur production, pour se condenser dans une tubulure latérale placée dans le haut de la cornue, tandis que le carbonate de soude formé s'écoule constamment par le bas.

Par ce système, on évite l'ébullition mousseuse qui se produit dans les autres procédés où la soude liquide baigne le charbon.

La température de l'opération est le rouge clair et alors les cornues ne sont que faiblement attaquées.

Chaque cornue est enveloppée d'une chemise protectrice en argile.

2° Production de l'Aluminium.

Le principe qu'on suivait jusqu'ici consistait à fondre la cryolithe ou le chlorure double et le sodium mélangés avec du sel marin, comme fondant, dans un creuset chauffé à haute température au four à réverbère ou dans des creusets.

L'Al. était ainsi en grenailles, mélangé à toute la masse et une grande partie du métal était dissous dans les fondants à cause de l'élévation de température pendant que les gouttelettes naissantes, au fur et à mesure de la réduction, traversaient la masse. Lorsqu'on opérait au four à réverbère, ces inconvénients disparaissaient en grande partie, mais la sole était attaquée.

Le procédé de « l'Alliance » permet la production de l'Al. instantanément en masse, formant un culot au fond du creuset.

On fond 100 parties de cryolithe avec 30 à 100 parties de NaCl dans un creuset réfractaire, au rouge. Quand la matière est liquide, on introduit au milieu et au bout d'une barre de fer un bloc de sodium représentant 30 parties : la conversion est terminée en quelques minutes.

On renverse le contenu du creuset dans un moule en fonte et, après solidification, on détache l'Al. réuni en un seul bloc.

La limitation de la température et la rapidité de l'opération sont des garanties contre la dissolution du silicium du creuset.

La réaction a lieu de la façon suivante : le sodium se volatilise peu à peu et ses vapeurs réduisent la cryolithe par suite du bouillonnement violent du bain. La température étant bien supérieure à celle de la volatilisation de sodium (qui est de 95 degrés), la réduction est immédiate.

L'Al. produit par les anciens procédés contient 4 pour 100 d'impuretés; ici, il est presque chimiquement pur à cause de la courte action du sodium sur les parois du creuset, avec lesquelles il n'est pas d'ailleurs en contact. Le creuset peut ainsi servir à plusieurs opérations, ce qui est une économie sérieuse.

(Ces renseignements sont tirés d'une brochure publiée par la Société en vue de l'Exposition universelle.)

L'« Alliance » avait d'abord employé le fourneau à réverbère (jusqu'en 1888) pour la production du sodium; sur une réclamation de M. Castner, M. Netto modifia son procédé et lui donna la forme que nous avons décrite.

L'usine de Walsend produit, dit-on, environ 60 tonnes d'Al. par an, livré au prix de 50 francs le kilogramme : tel était le renseignement fourni par son représentant à l'Exposition universelle de 1889.

L'*Engineering and mining* annonce que, de son côté, M. Krupp a acheté le brevet Netto pour son usine d'Essen, qu'il produit le kilogramme d'Al. à 15 francs et que le rendement de l'appareil employé est de $2^{kg},25$ par heure.

Il me paraît incontestable que si l'on pouvait se procurer de la cryolithe à un prix peu élevé, le procédé Netto offrirait un avantage tellement considérable sur le procédé Castner, que celui-ci ne tarderait pas à être abandonné. Mais à moins qu'on ne découvre de gisements abondants de cette substance ou qu'on ne la produise artificiellement à un prix peu élevé, ceux qui s'obstineraient à l'employer pour la fabrication de l'Al. en seraient bientôt réduits à transporter leur installation en Amérique, où le cryolithe revient à un prix bien plus bas.

On extrait au Groënland de grandes quantités de cryolithe. Les États-Unis ont employé, en 1888, 160.000 tonnes de ce minerai pour la fabrication de la soude caustique; mais ce minerai est impur : il contient de la silice qui le rend impropre à la fabrication de l'Al. Les parties pures sont rares.

Nous n'avons, d'ailleurs, pu trouver des renseignements suffisamment précis sur ces gisements du Groënland qui, on le comprend, n'ont été visités que par un petit nombre de personnes.

Procédé de MM. Brin frères.

MM. Brin frères sont des chimistes connus de Londres, où ils ont leur laboratoire 9 College, street, Belvedère road. »

Voici en quoi consiste leur procédé, qui doit être rangé dans les procédés chimiques, mais qui n'a plus la moindre connexité avec la méthode de Sainte-Claire Deville.

On mêle une argile ordinaire riche avec un réducteur, que les inventeurs nomment « flux », sans le désigner autrement; et on fait pâte avec l'eau.

On prend des barres de fonte crue (de 1re fusion) ayant pour section $\frac{1 \text{ cent.}}{5 \text{ cent.}}$, que l'on casse en morceaux; on les mélange avec la pâte et on fait des lits alternatifs avec du coke dans un petit fourneau à manche. On remplit avec du coke et on donne le vent. En 35 minutes environ, la fonte est fondue. L'Al., ainsi qu'il a été constaté, rend la fonte plus fluide.

Dès que la fluidité est obtenue, on coule dans une poche.

L'alliage produit est très sonore, car, suspendu à une corde et frappé avec un marteau, les vibrations continuent pendant 30 à 45 secondes. Il a une cassure fraîche, blanche et sans soufflures. La silice et autres impuretés ont passé dans la scorie.

MM. Brin ont encore fait l'expérience suivante :

Un fragment de fer doux est enduit d'argile et placé devant une tuyère. Au rouge clair, l'argile est réduite et l'Al. métallique pénètre dans le fer.

Le métal résultant est devenu cassant et aigre et a les propriétés de l'acier de première classe. On peut former, par ce même procédé, des alliages avec du cuivre et d'autres métaux.

On a fait ainsi du bronze mêlé à 17 à 20 pour 100 d'acier; cet alliage a une cassure aussi fine que l'acier fondu; par une série de recuits et de laminages, on peut même lui donner la structure fibreuse.

D'après M. Frédéric Vurley, l'acier alumineux de MM. Brin est un conducteur magnétique valant le meilleur fer, et, trempé, surpasse les meilleurs aimants permanents.

On a fait de même des alliages d'argent et d'aluminium.

On voit, qu'en somme, le procédé Brin ne permet pas d'obtenir de l'Al. mais des alliages d'Al. fort intéressants, sans doute, quoique en petite masse; au moins pouvons-nous dire que, jusqu'ici, on ne sait pas si ce procédé est susceptible de les produire en grande masse.

Le jour où ce résultat sera obtenu, on pourra dire que le procédé Brin aura jeté les bases d'une grande révolution dans la fabrication des alliages d'aluminium, en permettant l'emploi d'un minerai qui se trouve partout, et, dès lors, ces alliages pourront revenir à un prix très bas; c'est principalement à ce titre, mais aussi à la simplicité du procédé qui se rapproche des procédés ordinaires de la métallurgie, que ce procédé est fort intéressant.

Il est impossible d'en dire davantage pour le moment, les inventeurs ayant gardé le secret de leurs opérations (1).

Procédé de M. Faurie.

M. Faurie, ancien commandant d'artillerie, a publié dans les « Comptes rendus » un procédé de son invention qui ne paraît pas encore avoir été l'objet d'une application industrielle, mais qui mérite d'être signalé à cause de sa simplicité.

Ce procédé consiste à prendre 2 p. d'Al^2O^3 très pure en poudre, que l'on met en pâte avec du pétrole, de façon à former une masse homogène. On la mélange ensuite avec 1 p. d'acide sulfurique et on s'arrête quand on constate un dégagement d'acide sulfureux.

(1) D'après M. Francius, directeur supérieur de la douane, à Brême, l'Al., dans les alliages, peut être produit à raison de 1 marck (1 fr. 25) le demi-kilogramme et même moins par le procédé Brin; c'est un point qui serait de la plus haute importance, s'il venait à être confirmé.

La pâte est ensuite roulée dans du papier et jetée dans un creuset au rouge (environ 800 degrés) pour décomposer le pétrole. Ceci fait, on laisse refroidir.

Le produit compacte est pulvérisé et mélangé à un poids égal en poudre qu'on veut allier à l'Al. Ce mélange est mis dans un creuset en graphite. On ferme hermétiquement et on chauffe au rouge dans un four soufflé; on laisse refroidir, puis on ouvre. On trouve une poudre noire dans laquelle sont répandus les grains de l'alliage d'aluminium.

La même méthode, dit l'auteur, s'applique au silicium, au calcium, au magnésium, etc.

Je ne crois pas que ce procédé soit susceptible d'une application industrielle, sans être modifié.

Procédé Cuningham.

M. Albert Berwick Cuningham a pris des brevets pour la fabrication du sodium, l'aluminium, la cryolithe artificielle, etc., qui ont été achetés par la « British sodium and Aluminium Company, » fondée à 1.050.000 £, soit 26.250.000 francs.

Je ne suis pas en mesure de dire si cette Société est la même que celle d'Oldham, ni si ce procédé a déjà donné des produits, ni en quoi consiste la méthode de M. Cuningham.

Elle me paraît cependant intéressante à suivre, ne serait-ce qu'en raison de la préparation de la cryolithe artificielle qui la rapproche, sans doute, du procédé Netto.

Procédé Weiss.

M. Weiss, de Charlottembourg, près Berlin, a pris un brevet pour la formation d'alliages d'Al. par la formation directe du Cl sur les aluminates de K, Na, Ca, Ba, Mg et Z à l'état solide, ou dissous dans l'eau ou en suspension dans l'eau; je n'ai pas d'autres renseignements sur ce procédé, qui a été simplement annoncé par les journaux spéciaux.

Procedé Pearson.

On mélange 100 p. de cryolithe avec 50 p. de bauxite, kaolin ou alumine hydratée; 50 p. de Ca Cl, ou CaO, ou CaO, CO^2; 50 p. de coke ou anthracite. Le tout, en poudre, est chauffé dans un fourneau, ou bien dans un creuset brasqué, auquel cas on fait abstraction du coke dans le mélange. On chauffe pendant 2 heures et l'Al. est réduit et réparti en globules dans la masse.

Pour le réunir, on ajoute du fondant, Na, Cl ou KCl, et le métal se réunit en masse. Il est préférable cependant, suivant l'inventeur, de pulvériser la masse, et après l'avoir lessivée et séchée, d'y ajouter du zinc en fusion qui entraîne l'Al.

Il suffit alors de distiller le zinc et on a l'Al. en masse. On peut remplacer le zinc par du cuivre fondu, auquel cas on obtient directement le bronze d'aluminium.

Je ne sache pas que ce procédé, qui a été breveté en 1878, ait été l'objet d'une application industrielle.

Procédé Grabau.

Les journaux métallurgistes ont en outre cité le procédé de M. Grabau, sur lequel on n'a eu jusqu'ici que fort peu de détails.

Une note de M. Ichon, ingénieur des Mines, insérée dans les *Annales des Mines*, au mois de mai dernier, est de nature à éveiller l'attention des personnes qui tiennent à se mettre au courant des méthodes nouvelles pour la fabrication de l'aluminium.

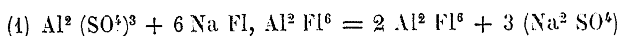
Ajoutons, cependant, que la note en question ne donne aucune indication sur la situation ou la consistance de l'usine où ce procédé aurait été expérimenté.

Le procédé Grabau est analogue au procédé Netto : il n'en diffère que parce que le sodium métallique est employé, dans ce dernier, à la réduction de la cryolithe naturelle fondue, tandis que M. Grabau substitue à la cryolithe naturelle le fluorure d'aluminium.

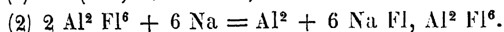
Dans son procédé, la moitié du fluorure est réduit; l'autre moitié se combine avec le fluorure de sodium produit pour faire de la cryolithe artificielle qui est employée, en partie, dans les opérations subséquentes.

Comme dans le procédé Netto, l'aluminium se trouve en forme de culot sous la scorie.

On obtient le fluorure de sodium en faisant agir le sulfate d'alumine pur sur de la cryolithe naturelle, qui se trouve régénérée à la fin de l'opération, ainsi que l'indiquent les deux équations ci-dessous :



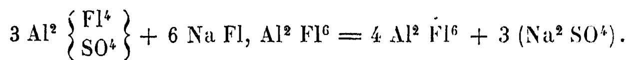
$$(1)\quad Al^2 (SO^4)^3 + 6\,Na\,Fl,\ Al^2\,Fl^6 = 2\,Al^2\,Fl^6 + 3\,(Na^2\,SO^4)$$



$$(2)\quad 2\,Al^2\,Fl^6 + 6\,Na = Al^2 + 6\,Na\,Fl,\ Al^2\,Fl^6.$$

En réalité, les choses ne se passent pas ainsi, car le fluorure d'aluminium ne s'obtient pas directement; mais on passe par l'intermédiaire d'un fluosulfate d'alumine $Al^2\,(Fl^4\,SO^4)$, obtenu par la réaction du spath fluor sur le sulfate d'alumine à la température de 60 degrés; il se dépose du sulfate de chaux.

Le fluosulfate traité par la cryolithe donne du fluorure d'aluminium et du sulfite de soude :



$$3\,Al^2 \left\{ \begin{matrix} Fl^4 \\ SO^4 \end{matrix} \right\} + 6\,Na\,Fl,\ Al^2\,Fl^6 = 4\,Al^2\,Fl^6 + 3\,(Na^2\,SO^4).$$



$$4\,Al^2\,Fl^6 + 12\,Na = 4\,Al + 2\,(6\,Na\,Fl,\ Al^2\,Fl^6).$$

De telle sorte qu'en employant une première mise de cryolithe naturelle, on obtient une quantité double de cryolithe artificielle.

Mais il n'y a qu'une partie du sulfate d'aluminium transformé. (M. Ichon dit qu'on n'a pas avantage à dépasser 55 pour 100; mais il ne donne par la raison de ce fait.) Il y a sans doute des pertes de cryolithe par les lavages ; mais on se

rend aisément compte qu'il y en aura toujours un excès qui pourra servir pour les verreries, d'après M. Ichon, et qu'on pourra, en tous cas, employer pour la fabrication de différents sels de soude.

M. Grabau prétend produire par ce procédé de l'Al. plus pur que par tous les autres procédés : c'est là une question qu'il est difficile de vider tant que l'on ne sera pas fixé sur le point de savoir si M. Grabau fournit des produits de laboratoire ou s''il opère par des procédés vraiment métallurgiques.

Quoi qu'il en soit, on comprend fort bien que ce procédé élimine les impuretés de la cryolithe naturelle qu'on emploie que dans l'opération du début.

On a prélevé deux échantillons d'aluminium produits l'un avec la cryolithe naturelle, l'autre avec la cryolithe artificielle, et l'analyse faite au bureau d'essai de l'École supérieure des mines a donné les résultats suivants :

	PRODUIT de la cryolithe naturelle.	PRODUIT de la cryolithe artificielle.
Si	1,12	0,66
Fe	3,71	0,17
Mn	0,21	traces.
Al	94,96	99,77

Nous rappellerons, à cet effet, le moyen employé par M. Netto pour obtenir l'Al. à 99 p. 100 par la réduction de la cryolithe naturelle à l'aide du sodium, en opérant en deux fois. Or, il me semble que la production du fluosilicate, puis sa transformation en fluorure d'aluminium, opérations qui exigent passablement de main-d'œuvre, doivent influer sur le prix de revient d'une façon analogue à la première opération du procédé Netto.

Le bas prix de l'Al. (14 fr. le kilogramme) auquel M. Grabau prétend être arrivé résulterait de l'emploi de son procédé particulier de production du sodium par l'électrolyse du sel marin fondu. Ce prix serait ainsi réduit à 2 francs le kilogramme. En admettant ce prix, qui n'est pas contrôlé, il y aurait déjà 6 fr. de sodium par kilogramme d'aluminium : il ne resterait plus que 8 francs pour toutes les autres opérations.

Pour arriver à ce résultat, M. Ichon donne le détail du prix de revient dans lequel les frais de réparation et d'amortissement n'entrent que pour 30 francs, alors que le capital de premier établissement est évalué à 179.000 francs. Il me paraît nécessaire de doubler les frais de réparation et d'amortissement, ce qui n'ajoute, il est vrai, que 1f,50 par kilogramme d'aluminium, puisque la production journalière est évaluée à 20 kilogrammes.

Mais il est évident que la plupart des nombres fournis sont susceptibles de correction, et il conviendra d'attendre des renseignements plus précis pour juger le procédé de M. Grabau au point de vue industriel.

D'après les derniers renseignements que j'ai recueillis, M. Grabau n'a installé aucune usine; de telle sorte que les nombres fournis par M. Ichon n'auraient qu'un caractère hypothétique.

Il me paraît intéressant de signaler un autre procédé de préparation de la cryolithe artificielle ou, du moins, du fluorure de sodium, en raison de l'im-

portance qu'aurait la préparation économique de cette substance sur la préparation de l'aluminium.

Procédé Zsigmondy (*Annales de chimie*, 1889, p. 456).

On fond du spath fluor (fluorure de calcium) avec du sable et du carbonate de potasse; la masse, reprise par l'eau, évaporée, puis additionnée d'une solution concentrée de carbonate de soude, laisse précipiter du fluorure de sodium peu soluble et il se régénère du carbonate de potasse qui rentre dans la fabrication. Ce procédé a une certaine importance en raison du prix relativement bas du spath fluor, qui est très répandu dans la nature.

Il est certainement moins long et moins coûteux que celui de M. Grabau.

Procédé Reillon, Montagne et Bourgerel.

Ce procédé a été breveté en juin 1887; il consiste à traiter l'alumine par le charbon et le sulfure de carbone. On mélange d'abord l'alumine avec du noir de fumée, en y ajoutant de l'huile ou du goudron de façon à former une pâte épaisse. On met cette pâte dans un vase clos capable de supporter une forte température. On chauffe assez fort pour décomposer l'huile ou le goudron, on obtient ainsi une masse de charbon alumineux. Après refroidissement, on le casse en petits fragments et on l'introduit dans une cornue à deux tubulures. L'une sert à y faire passer un courant de sulfure de carbone, l'autre permet à l'acide carbonique de s'échapper.

Le sulfure d'Al. ainsi obtenu est traité à haute température dans une cornue analogue à la précédente, dans laquelle on fait passer de l'hydrogène carboné. Il se dégage de l'acide sulfhydrique et il reste Al. pur.

Il ne paraît pas que ce procédé ait encore reçu une application industrielle.

Tels sont les procédés chimiques actuellement connus pour la fabrication de l'aluminium et de ses alliages. Parmi ces procédés, ceux de Castner et de Netto ont seuls obtenu une application étendue; le procédé Brin, plus récent, paraît des plus intéressants et a déjà dépassé les limites d'un procédé de laboratoire; peut-être un grand avenir lui est-il réservé; et si ces espérances se réalisent, on pourra obtenir des alliages d'aluminium à un prix extrêmement bas, leur permettant de prendre avantageusement la place de l'acier.

Quant aux autres procédés que nous avons indiqués, ce ne sont encore que des procédés de laboratoire. Il est impossible de prédire si tel d'entre eux n'aura pas un jour une importance industrielle.

II. — MÉTHODE ÉLECTRIQUE

Les procédés électriques employés pour la fabrication se divisent en deux classes : 1° ceux où la décomposition du minerai est due à l'énorme température développée par l'arc voltaïque qui jaillit entre les deux pôles d'un courant dynamo-électrique interrompu; 2° ceux où c'est principalement l'action électrique du courant qui agit, aidée sans doute par l'action de la chaleur de l'arc.

Dans les premiers l'action calorifique est extrêmement intense et la température énorme; dans les autres, elle est beaucoup moins élevée. J'appellerai les premiers électro-dynamiques et les autres électrolytiques; enfin je réserverai le nom d'électro-chimiques à une classe de procédés dont il n'a pas encore été question et qui donnent l'Al. ou ses alliages par l'électricité voltaïque, en d'autres termes, par une pile.

A. PROCÉDÉS ÉLECTRO-DYNAMIQUES

Procédé de MM. Cowles frères.

Le procédé Cowles a été décrit dans l'*Engineering de New-York* (vol. LX, p. 92 et 199), dans le *Sthal und Eisen*, article déjà cité de M. Kossmann, dans *Inst. Franklin Journal*, etc.

Les premiers brevets de MM. Cowles datent de 1885, mais ce n'est qu'en 1887, après avoir donné à leur méthode plusieurs perfectionnements successifs et une grande extension, que l'apparition sur le marché de grandes quantités de bronze d'Al. produisit une véritable émotion dans le monde industriel.

Voici en quoi consiste, sommairement, le procédé Cowles.

De l'alumine (bauxite, corindon, émeri, etc.) en morceaux est mélangée avec des fragments de charbon. On en fait un prisme carré de 1 mètre de long et de $0^{m},075$ de côté, et on le place recouvert de charbon en poudre dans un fourneau (de $1^{m},50$ de long sur $0^{m},30$ de large) en briques réfractaires, fermé par un couvercle percé de trous pour le dégagement des gaz.

Les électrodes sont formés de prismes de charbon de $0^{m},075$ de côté et $0^{m},75$ de long. L'arc jaillit entre eux et fond le métal à allier avec l'Al.

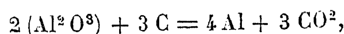
Le courant est de 1.600 ampères. A mesure que l'alumine se réduit on éloigne les électrodes pour maintenir dans le courant une résistance constante; cet éloignement se fait automatiquement par un mécanisme d'horlogerie.

Dans cette opération, la température énorme qui a lieu dissocie l'alumine et l'O. qui s'en dégage est empêché par l'oxyde de carbone de se recombiner avec le métal; on voit, en effet, ce gaz brûler par les trous du couvercle.

La preuve de la volatilisation de l'Al. est fournie par l'apparition d'une fumée blanche qui est sans doute l'alumine reformée dans les régions froides du récipient.

Il me semble qu'on peut prouver directement que c'est la dissociation de l'alumine par l'électricité qui produit l'aluminium et non la réduction par la combustion du charbon à l'aide de l'oxygène de l'alumine; en effet, la chaleur de formation (et par suite de décomposition) d'un équivalent d'Al^2O^3 est 391 600 calories.

On aurait :



$$2\,(Al^2O^3) + 3\,C = 4\,Al + 3\,CO^2,$$

dans l'hypothèse de la réduction par le charbon.

La chaleur de formation de CO^2 est 97.000 calories.

$$3\,CO^2 \text{ donnent } 3 \times 97.000 = 291.000 \text{ cal.}$$

Or la chaleur de :

$$2\,Al^2O^3 \text{ est } 2 \times 391.600 = 783.200 \text{ cal.}$$

L'hypothèse est donc inadmissible; c'est donc la chaleur déterminée par la résistance au courant qui produit la dissociation de l'Al^2O^3.

Ce procédé ne produit pas de l'Al. pur, mais donne directement des alliages de ce métal.

Pour faire du bronze, on dispose le cuivre en couche de baguettes croisées; dans ce cas, l'Al. ne se volatise pas, mais il est immédiatement absorbé par le cuivre en fusion.

Ces bronzes contiennent, d'après M. Kossmann, 3 à 10 p. 100 de Si et 3 p. 100 de Ca; les aciers aluminés, 6 à 10 p. 100 de Si et 2,5 à 3,7 p. 100 de Ca; je ne donne ces nombres que sous la responsabilité de l'auteur, d'autant plus qu'ils ne concordent pas avec ceux donnés par MM. Cowles. (Voir ci-dessus les tableaux.)

Le quartz est réduit en présence du cuivre qui en absorbe 14 p. 100.

MM. Cowles ont modifié le premier procédé en vue de la continuité de l'opération.

L'électrode positif est transformé en un tube vertical par lequel les matières sont versées, à l'aide d'une trémie. Une baguette de charbon traverse ce tube et sert à remuer les matières. L'électrode négatif est ici la sole du fourneau, entourée d'une masse isolante.

On produit $2^{kg},25$ d'Al. allié au cuivre, par heure, avec 120 chevaux-vapeur-heure (que je désignerai pour abréger par chx-v-h), soit 1 kilogramme par 53,2 chx-v-h, au maximum; en moyenne 40 chx-v-h. Théoriquement 8,87 chx-v-h suffiraient.

La Cowles « Electric smelting and aluminium Company » possède à Lockport, près New-York, une chute d'eau de 1.000 chx-v-h. L'opérateur est un dynamo de 500 chx-v-h.

Le kilogramme revient à 50 francs (ce renseignement a plus d'un an de date).

On a fondé récemment une société en Angleterre pour l'exploitation de ce procédé, laquelle porte le nom de « Cowles syndicat Company » et dont l'usine est à Milton, près Stoke-on-Trent. On y emploie une grande machine dynamo à

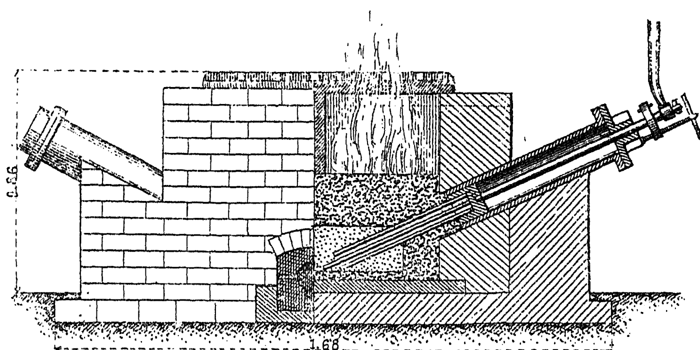
courant continu de 300.000 wats; on y a ajouté une deuxième machine, pesant 17.000 kilogrammes, qui possède un moteur de 800 chevaux nominaux; cette machine donne 402.000 wats à 300 tours par minute.

Cette machine travaille réellement à 500 et 540 chevaux.

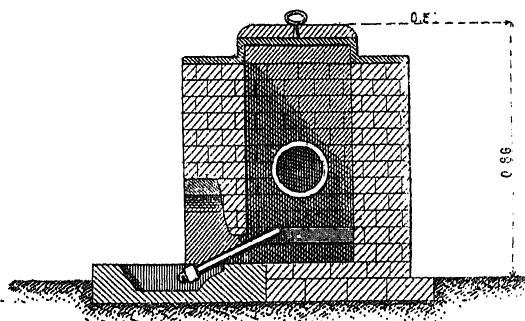
Elle est remarquable par son régulateur, qui lui permet de supporter des variations de courant de 2.000 à 9.000 ampères et de 20 à 80 volts, tout en marchant sans bruit.

Le dynamo a été construit sur les dessins de M. Crompton; à la vitesse de 380 tours on obtient 5.000 ampères et 60 volts.

Four Cowles, à Milton.



Élévation et coupe longitudinale.



Élévation, coupe transversale.

A Lockport, avec un dynamo Brush, on était arrivé à produire 1 kilogramme d'Al. par heure avec 77 chevaux, en allure de bronze d'aluminium; en allure de ferro-aluminium, il en fallait 125.

A Milton, avec la machine Crompton, on a produit en allure de bronze 1 kilogramme d'Al. par 25 chevaux.

Mais la moyenne est de 45 chevaux. Le progrès est donc considérable. M. Crompton estime qu'en construisant un dynamo de 20.000 ampères on arriverait près du rendement théorique.

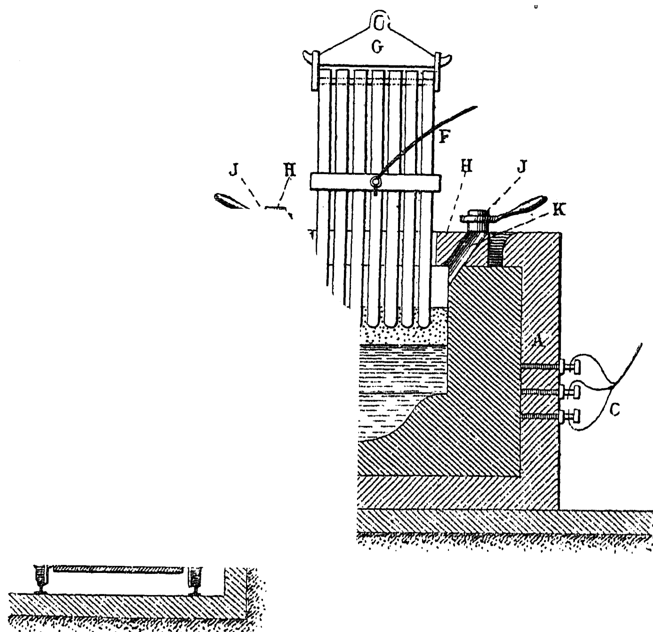
Enfin la société « The Aluminium Brussaud bronze Company » a été récemment fondée à *Waterburry* pour exploiter le procédé Cowles.

D'après M. J. H. S. Dragger, dans une communication lue à l'Association britannique pour l'avancement des sciences, à Newcastle, le 13 septembre 1889, il y aurait à Lockport 14 fourneaux Cowles produisant 300 livres d'Al. par vingt-quatre heures; il y aurait 4 autres fourneaux en construction.

Nous reviendrons plus loin sur ces renseignements.

Procédé Héroult.

Ce procédé, analogue au système Cowles et devenu son rival en Europe, fonctionne dans l'usine de Neuhaüsen, près Schaffouse (Suisse), où l'on a d'abord appliqué le procédé Kleiner, dont il sera parlé plus loin; et à l'usine de Froges (Isère) de la « Société électro-métallurgique française. »



Boîte en fer. — B. Bloc de charbon. — C. Électrodes. — D. Trou de coulée. — E. Tampon. — F. Baguettes de charbon formant pôles. — G. Chape. — H. Couvercle du creuset. — J. Trous de chargement. — K. Couvercles de J. — L. Poche.

Le procédé Héroult consiste donc à décomposer l'alumine par la chaleur un courant de machine dynamo-électrique.

Nous supposerons, d'abord, qu'il s'agit de fabriquer un alliage d'aluminium.

L'appareil de fabrication, figuré en coupe ci-contre, consiste en un creuset en charbon comprimé, consolidé par des plaques de fer.

Primitivement, alors qu'on f.isait des essais en petit, le creuset était placé dans une boîte en fer qu'on chauffait au rouge et qui, en se refroidissant, se contractait et serrait fortement le charbon. On pensait que cette pression était nécessaire pour établir la continuité électrique; mais il n'a plus été possible de procéder ainsi pour des creusets de grande dimension, et l'expérience a montré que les plaques ajustées sur les parois planes du creuset donnaient une conductibilité parfaite.

L'électrode positif est formé de baguettes de charbon réunies par une traverse à l'aide de clous en cuivre, et, à la partie supérieure, par une chape terminée par un anneau, lequel se continue par une chaîne qui s'enroule sur le tambour d'un treuil. C'est par ce moyen qu'on descend l'électrode à mesure que les bouts de charbon sont consumés.

La distance de l'électrode au bain métallique fondu ne doit pas dépasser 3 millimètres. M. Héroult insiste fortement là-dessus.

L'intervalle étant rempli par du minerai fondu, mauvais conducteur de l'électricité, offre une résistance qui croît avec la distance. Cependant il faut qu'il y ait une résistance pour qu'il y ait échauffement, mais il n'en faut pas plus que la chaleur nécessaire à la fusion du minerai. S'il y a plus de résistance, il y a perte de chaleur sans compensation.

M. Héroult prétend que le dégagement d'oxygène (par la réduction de l'aluminium) est dû à l'action électrolytique et pas seulement à la chaleur. Or, c'est précisément là le point controversé, celui qui a soulevé des discussions passionnées sans qu'une expérience précise ait apporté un argument décisif.

Cette discussion a été soulevée lors du procès en contrefaçon que Cowles intenta à la Société suisse de Neuhausen à la cour de Berlin.

Les deux parties choisirent pour experts des hommes fort savants et compétents en la matière, d'Europe et d'Amérique, qui ne purent se mettre d'accord.

Cowles soutenait que le procédé Héroult était identique au sien; Héroult prétendait que le procédé Cowles décompose l'alumine par la chaleur aidée du charbon, tandis que le sien consiste véritablement à une fusion de l'alumine par l'arc électrique suivie de l'électrolyse du minerai fondu; tandis que Cowles n'obtient de réduction que grâce au mélange du charbon avec l'alumine; le charbon et le cuivre étant meilleurs conducteurs que l'Al., c'est par ces corps que passe le courant, — en court circuit,— et ce n'est qu'ultérieurement que l'alumine, fondant à son tour, devient conductrice.

Quoi qu'il en soit, le procédé Héroult peut être considéré comme une simplification du procédé Cowles, auquel reste toujours le mérite de la priorité.

M. Héroult insiste beaucoup sur la fusion préalable de l'Al., qui forme une couche fluide sur le cuivre fondu sans y être mélangé; et il en donne pour preuve que si l'on coule avant réduction complète il s'écoule par le trou de coulée de l'alumine fondue qui suit le bronze, et, en se refroidissant, produit une cristallisation remarquable.

Une autre preuve que l'anode ne plonge que dans l'alumine fondue, sans

être en contact avec le cuivre, c'est qu'en abaissant brusquement celle-ci une variation subite d'intensité dans le courant, précisément au mom l'on a atteint le cuivre fondu.

Tout cela est exact; mais ne peut-on pas en dire autant du procédé C puisqu'en définitive l'alumine n'y devient également conductrice q avoir été fondue? Le charbon qui y a été mélangé économise du coura par là, facilite la réduction, et en brûlant lui-même économise le charl l'anode dont l'usure est faible. Mais, par contre, l'Al. naissant décomp partie l'oxyde de carbone qui se forme autour de lui, et c'est ce qui ex le rendement inférieur du procédé Cowles. Et, par conséquent, le p Héroult constitue, à ce titre, un véritable perfectionnement. Je crois qu dans l'examen attentif de cet argument que l'on trouve la meilleure de l'indépendance des deux procédés, malgré leurs grandes analogies.

En résumé, la contestation scientifique n'a pas été complètement mais la cour de Berlin a donné tort à Cowles.

Ajoutons qu'un des arguments invoqués par Héroult est qu'on peut p pour le procédé Cowles une machine à courants alternatifs, preuve que c'est la chaleur et non l'électricité du courant qui réduit l'alumine, que le procédé Héroult exige une machine à courant continu.

Je ne suis pas bien fixé sur ce point. Mais Héroult fait observer q procédé exige une tension minima au-dessous de laquelle il n'y a plus position de l'alumine, tandis que Cowles produit cette décomposition plus faibles tensions, à la condition d'augmenter la section transver fourneau, ou plutôt du mélange d'alumine et du charbon; de telle sc l'action chimique provenant du contact direct des matières mélangées drait prédominante.

Je crois qu'il serait nécessaire d'étayer ces affirmations de preuves *riques* qui n'ont pas été produites jusqu'ici.

Reprenons la description du procédé Héroult.

Le minerai est de la bauxite lorsqu'on peut se la procurer exer silice et d'autres impuretés. Mais on préfère fabriquer l'alumine pure, de cette substance n'étant pas comparable à la dépense de force motr mentée des frais généraux de l'usine.

On fait écouler, de temps en temps, l'Al. fondu de telle sorte que l ment est continu.

Un cheval-vapeur donne par heure 30 à 36 grammes au maximum Al. allié.

On procède identiquement de la même façon pour faire du bron seulement, au lieu d'alumine pure, on charge du sable blanc.

Les moteurs à Neuhausen sont des turbines Jonval, à Froges des verticales de 300 chevaux, actionnant deux dynamos. Une poulie c l'arbre moteur met en mouvement une machine excitatrice spéciale. L de la turbine est réglée par un vannage à la main ou un vannage tique.

Les conducteurs sont des câbles en cuivre non isolés.

On comprend, en effet, que pour une dépense de force aussi considérable on peut perdre sans inconvénient 100 ampères, par exemple.

Le courant est mesuré par un grand ampéremètre circulaire interposé; il contient un électro-aimant excité par une batterie primaire; l'aiguille indicatrice de l'ampéremètre est munie d'un contre-poids. Le calibrage de l'instrument peut être dressé en rapprochant ou en éloignant le contre-poids de centre de suspension et est réglé de manière à avoir une assez forte déviation de l'aiguille en marche normale.

Lorsqu'une des baguettes de l'électrode positif est en saillie sur les autres et touche le métal fondu, il est immédiatement brûlé; mais pendant la combustion la résistance étant diminuée, le courant est notablement plus intense et on pourrait croire que ce renforcement du courant est dommageable pour la machine. Or, il paraît qu'il n'en est rien; tout se borne à une décharge d'étincelles aux balais et à une accélération des turbines.

Le courant est de 6.000 ampères et la force potentielle de 20 volts, à la vitesse de 180 tours par minute.

Mais la machine est capable de donner 30 et même 35 volts.

D'après la *Schweitzerische Bauzeitung*, l'usine de Neuhausen produisait, au printemps 1888, 300 kilogrammes d'Al par jour (ou plutôt son équivalent en bronze à 10 p. 100. Le même renseignement se trouve dans la *Revue commerciale de Kuhlow*.

Ce renseignement était certainement exagéré pour l'époque, car, actuellement, où la force motrice employée est plus grande, l'usine ne produit encore que 200 kilogrammes par jour, au grand maximum.

Lorsqu'on fabrique du bronze par ce procédé, le cuivre est mis dans le creuset à l'état de division : il est électrisé négativement et préalablement fondu.

On n'ajoute d'Al^2O^3 qu'après la fusion du cuivre. L'O se porte au pôle positif et brûle le charbon, et l'Al. au pôle négatif où il s'incorpore au cuivre. On recharge de l'alumine après chaque coulée partielle de l'Al., de façon à ce que l'opération soit bien continue.

Il a été formé, dans ces derniers temps, une grande société par des banquiers suisses et allemands pour exploiter le procédé Héroult en Allemagne, France, Italie, Autriche, Belgique et Espagne. Elle a pris le nom de « Aluminium-Industrie-Gesselschaft. » Deux administrateurs de cette société font déjà partie de la société suisse de Neuhausen, laquelle conserve ses brevets en Angleterre, aux États-Unis d'Amérique et au Canada.

M. Héroult prétend que son procédé permet de donner l'Al. en première fusion à 99 et même 99,5 p. 100 de pureté.

En réalité, pas plus que le procédé Cowles, le procédé Héroult n'est employé pour la production directe de l'aluminium, et nous verrons, par la description de l'usine de Froges, les modifications qu'il a fallu introduire dans ce procédé pour marcher en aluminium pur.

Cette modification est précisément l'objet du brevet de M. Kiliani, appliqué à Froges et à Neuhausen.

B. PROCÉDÉS ÉLECTROLYTIQUES

Procédé Graetzel.

Le plus important de ces procédés et le plus ancien en date est le procédé Graetzel, breveté en 1883, et exploité dans l'usine de Hemelingen, près Brême, dont il a déjà été question.

M. Kossmann, en rendant compte de ce procédé dans le mémoire déjà précité, dans *Stahl und Eisen*, dit que de même que l'on fait remonter la fabrication chimique de l'Al. à Sainte-Claire Deville, il y a lieu de faire remonter à Bunsen les procédés électriques.

Bunsen obtenait ce métal en décomposant le chlorure double d'aluminium et de sodium par un couple voltaïque. Mais ce n'était là qu'un des mille cas d'électrolyse examinés par les chimistes et ne présentant aucun caractère industriel; tandis que le procédé Sainte-Claire Deville a été appliqué dès 1858 et jusqu'à nos jours par l'usine de Salindres. Cette constatation on la fait, avec d'autant moins de regret, que la gloire de Bunsen est assez grande pour n'en être pas amoindrie.

Les frères Siemens ont les premiers employé le courant électrique à forte tension pour la fabrication de l'Al. en 1883; peu de temps après, en septembre 1883, Graetzel prit son brevet à la fois pour l'aluminium et le magnésium.

Ce dernier métal est tiré de la carnalite qui est facilement réductible.

Pour fabriquer l'Al. on place dans un fourneau, électrisé négativement, plusieurs creusets; dans chacun d'eux pénètre un pôle positif environné d'un isolateur qui traverse le fond vers la paroi; le Cl. se dégage par la gaîne isolante sans arriver au contact des gaz réducteurs qui circulent dans un tube qui traverse le couvercle du creuset.

Le minerai est le chlorure double mélangé avec du charbon en poudre.

Ce procédé, d'abord essayé en petit, est très semblable à celui que Berthaut fit connaître en 1881. Graetzel l'a modifié en ajoutant de la cryolithe au chlorure double.

D'après Kossmann, l'usine d'Hemelingen peut livrer 1.000 kilogrammes d'aluminium en quelques semaines : ce renseignement manque un peu de précision. Il prétend qu'elle donne déjà le kilogramme d'Al. à 50 p. 100 meilleur marché que la Société française d'aluminium (est-ce de Salindres qu'il parle ?) et qu'elle est seule à produire l'Al. métallurgique sur le marché; enfin, ajoute-t-il : « le public allemand devra recueillir ces résultats avec une joie d'autant plus grande que, parmi les nations rivales, c'est une invention allemande qui, silencieusement, atteint son but qui est d'arriver aux applications pratiques ».

Je ne suis pas en état, actuellement, de contrôler toutes les assertions de

l'auteur qui me paraissent dériver d'un optimisme patriotique, qui pourrait ne pas être consacré par l'expérience.

De véritable marché d'aluminium il n'y en a pas encore en réalité. En France, en Angleterre, aux États-Unis, en Allemagne et en Suisse, il y a des usines qui produisent de l'aluminium en quantité suffisante pour les besoins actuels; mais dans un avenir fort peu éloigné, d'autres rivaux entreront en ligne et il me paraît impossible de prédire lequel remportera la palme.

Procédé de Kleiner.

Le procédé de M. Kleiner est celui qui, d'après l'*Engineering de New-York*, aurait été d'abord appliqué à Neuhausen; mais il est abandonné depuis que cette usine a acquis le brevet Héroult.

Tandis que les procédés Cowles et Héroult emploient l'électricité comme source de chaleur (les auteurs américains soutiennent tous la thèse de Cowles contre Héroult), développant ainsi une chaleur énorme et une température inusitée, capable de fondre l'alumine qui, dans cet état physique, devient conductrice de l'électricité — et dès lors, est facilement décomposée par le courant — le procédé Kleiner opère la réduction de ce minerai à une température relativement basse par l'action électrolytique du courant.

Le minerai est la cryolithe en poudre qui est facilement fusible; l'électrolyse met l'Al. en liberté et il reste du fluorure de sodium. Ce dernier est soluble dans l'eau et, après lixiviation, il reste un bloc d'Al. métallique.

Voici comment se fait l'opération : on prend un creuset de plombagine, comme dans le procédé Héroult, dont le fond est traversé par un électrode de charbon qui forme le pôle négatif. [Cet électrode est formé d'un paquet de baguettes de charbon, tandis que le pôle positif est un bloc unique de cette même substance]. Celui-ci est fixé à une potence en regard du pôle positif.

Le procédé Kleiner a été perfectionné de la façon suivante : on comprime à la presse hydraulique de la bauxite en poudre dans un réceptacle quelconque, puis on la creuse pour recevoir le minerai. On rapproche les électrodes de façon à faire jaillir l'arc, puis on ajoute peu à peu la cryolithe en poudre; le centre du bain devient brillant et on maintient la température aussi basse que possible pendant deux à trois heures.

Le fluorure de sodium dissous, après l'opération, sert pour la fabrication de sels de soude et s'il y a du minerai inattaqué, il passe à l'opération suivante :

La cryolithe employée provient du Groënland et coûte 450 à 500 francs la tonne ; on voit que ce chiffre est inférieur à celui accusé par la Société « l'Alliance ».

Il faut ajouter que le fluorure de sodium dissous après l'opération pourrait servir à la préparation de cryolithe artificielle, par un des moyens sus-indiqués; et on arriverait ainsi à un abaissement du prix de l'Al.

Le brevet Kleiner est de 1886; il paraît qu'il est encore appliqué par le major Ricard Leaver, dans une usine de Farringdon road (Londres).

Je n'ai pas de renseignements sur cette usine et, en me trouvant à Londres, je n'ai pu en trouver nulle part.

Procédé de Rogers.

La Société qui exploite ce procédé, resté secret, a son usine à Milwaukée (État du Visconsin). Tout ce qu'on peut en savoir, c'est que le métal est produit par l'électricité.

Procédé Bernard ou Minet.

MM. Bernard frères ont fait, à Paris même, l'essai d'un procédé électrolytique qui a été perfectionné par Minet et est actuellement appliqué dans l'usine Bernard, à Creil (Oise).

Le bain qui subit l'influence du courant et qui est à l'état de fusion ignée, contient 30 à 40 p. 100 de fluorure d'aluminium et de sodium (obtenus artificiellement) et 70 à 60 p. 100 de sel marin. Pendant la durée de l'opération, la composition, la température et la fluidité du bain sont maintenues constantes. Le fluorure d'aluminium est l'électrolyte principal : le fluore passe au pôle positif, l'aluminium au pôle négatif. La force électromotrice est de 4 à 5 volts seulement (la force théorique étant de $3^v,5$ ainsi que nous l'avons dit plus haut).

Un cheval-heure donne la production de 30 grammes environ d'Al.

Pour 1 kilogramme d'Al. il faut 3 kilogrammes de fluorure d'Al., mais une addition de bauxite permet de régénérer le bain au fur et à mesure de son appauvrissement, de telle sorte qu'il ne faut, en définitive, que $1^{kg},5$ de fluorure pour 1 kilogramme d'Al.

La bauxite n'est employée que lorsqu'on marche en ferro ; lorsqu'on veut de l'Al. pur on régénère avec de l'alumine pure.

La composition actuelle du bain est de 1 kilogramme de cryolithe,
— — 2 — fluorure,
— — 4 — alumine,

on y ajoute du sel marin pour la fusibilité du bain, mais il n'est pas électrolysé. Pour 6 à 7 kilogrammes du mélange précédent, on a 1.800 grammes d'Al. L'alumine est achetée dans le département de l'Oise à 47 francs les 100 kilogrammes et contient de 50 à 60 p. 100 d'Al.

Le bain est contenu dans une cuve métallique dans laquelle se trouvent plusieurs creusets où plongent les électrodes en charbon; pour empêcher celle-ci d'être attaquée, elle est réunie aux électrodes négatifs par un courant en dérivation qui introduit une résistance préservatrice du métal de la cuve.

La cuve est en fonte ou en fer soudé et est un parallélipipède de $\frac{0^m,35}{0^m,40 \times 0^m,40}$.

Chacune dure de quatre à six semaines.

Sans la dérivation le bain s'enrichirait aux dépens du métal de la cuve qui formerait un fluorure. Sous chaque creuset, on dispose une poche où l'aluminium se réunit. Il se dépose également sur les bords de la cuve un peu d'Al. qui est écoulé, par intermittence, à l'aide d'un trou dè coulée inférieur. Cette partie du métal est combinée avec une certaine quantité de fer et forme des alliages allant jusqu'à 20 p. 100 de teneur en fer.

En diminuant la force électromotrice, en même temps qu'on augmentait l'intensité, on est arrivé à supprimer presque complètement ce dépôt d'Al.-ferro qui est, en définitive, une perte pour la fabrication du métal pur et une cause de détérioration pour les cuves.

Une cuve peut produire de 4 à 5 kilogrammes de métal pur par jour ou 6 à 7 kilogrammes d'alliages.

L'usine Bernard a obtenu, dans la section française, une médaille d'or à l'Exposition universelle de 1889. Ajoutons que l'usine de Creil doit être déplacée et agrandie plus ou moins prochainement et installée dans des conditions plus importantes.

C. MÉTHODE ÉLECTRO-CHIMIQUE

Procédé Reinbold.

Cette méthode a pour but d'aluminer des objets métalliques.

Le système de M. Hermann Reinbold consiste à préparer une solution contenant 50 parties d'alun dissous dons 300 parties d'eau. On y ajoute 10 parties de chlorure d'aluminium. On chauffe à 200 degrés, puis on laisse refroidir; enfin, on ajoute à la solution 39 parties de cyanure de potassium, l'électrolyse se produit par un élément voltaïque et l'objet à aluminer est placé au pôle positif du bain électrolytique où l'Al. vient se déposer.

Il me reste à faire connaître certains détails que j'ai recueillis sur place en visitant les usines d'Europe qui produisent l'aluminium ou ses alliages et qui complètent, dans une certaine mesure, les renseignements produits ci-dessus.

USINE D'ALUMINIUM DE FROGES

La « Société électro-métallurgique française » a établi son usine à Froges (Isère), au débouché du ravin des Adrets, capté à une altitude supérieure de 180 mètres par une conduite dont le débit correspond à une puissance motrice évaluée de 800 à 1000 chevaux, ce qui correspondrait à un débit de 333 à 416 litres par seconde.

L'installation comprend deux usines : l'une située au haut de la commune de Froges où se fabrique l'aluminium, l'autre dans la commune de Champ, à 200 mètres en aval, qui est spécialement réservée à la fabrication du charbon électrique.

Les moteurs consistent en 3 turbines : deux de 300 chevaux, chacune faisant mouvoir deux machines dynamo, système Brown, fournies par la maison Escher, Wyss et Cie, d'Oerlikon, près Zurich; la troisième de 100 chevaux qui fait mouvoir la machine excitatrice, fournie par la même maison, et qui met également en mouvement les machines-outils et la soufflerie. Cette même machine fournit, en outre, la lumière électrique pour le travail de nuit.

Chaque dynamo peut fournir 6.000 ampères. On marche avec 4, 5 ou 6 fours, suivant la quantité d'eau dont on dispose; la moitié est actionnée par une des deux grandes machines dynamo et emploie 30 volts, soit 10 volts par four. En réalité, on n'emploie que 3.000 ampères de chaque machine. Chaque dynamo possède 2 collecteurs symétriquement placés avec 72 balais chacun.

Les dynamos sont à 6 pôles; l'excitatrice en a 2. Ces machines ayant été décrites dans des traités spéciaux, nous n'en ferons pas la description.

Les machines et les turbines occupent la largeur de l'usine du côté amont; puis viennent se placer les fours à aluminium sur une rangée parallèle.

Les fours destinés à la refonte de l'aluminium ou à la fusion du bronze, du laiton et même de la fonte ordinaire pour moulages, occupent une rangée disposée devant le mur d'aval.

Devant ces fours est placé l'atelier de moulage; enfin, la partie centrale de l'usine est occupée par les machines-outils, c'est-à-dire par l'atelier mécanique.

Les annexes de l'usine comprennent les magasins (matières premières, produits, etc...) et le laboratoire de chimie. Ce dernier se compose lui-même de deux pièces : l'une est consacrée aux essais de traction des métaux produits dans l'usine à l'aide d'une machine spéciale, l'autre est exclusivement consacrée aux analyses chimiques. Un échantillon est prélevé sur chaque coulée, aluminium, bronze d'aluminum, ferro-aluminium ou laiton d'aluminium et soumis à l'analyse. On fait de même de fréquents essais à la traction. Cette double épreuve établit un contrôle permanent et continu sur les produits livrés par l'usine.

Turbines. — Les turbines sont verticales, du système Girard, à libre déviation.

Chaque turbine est enveloppée d'une chemise en tôle. Un moteur de cette espèce est extrêmement avantageux par le peu d'espace qu'il exige, l'absence à peu près complète d'entretien et la facilité qu'il offre de pouvoir être placé en un point quelconque de l'usine.

Les grandes turbines à Froges font de 180 à 220 tours à la minute; leur diamètre est de $2^m,60$.

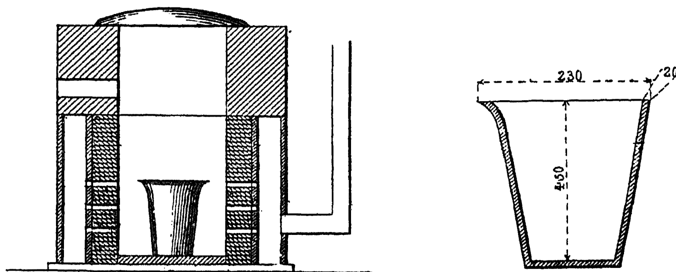
Fours de fusion. — Nous avons dit que les fours de fusion (au nombre de huit) sont soufflés. Le ventilateur prend son mouvement sur une poulie de l'arbre de transmission actionné par l'excitatrice et le vent passe dans une conduite générale placée contre le mur aval de l'usine d'où un branchement aboutit à chaque four.

Un four est formé d'une double enveloppe en tôle, intérieurement garnie de briques réfractaires dans laquelle pénètre le vent. Le garnissage de brique

est percé de nombreux trous en quinconce par où le vent arrive sur le charbon incandescent jeté au fond du four, et la combustion une fois commencée, continue indéfiniment tant qu'on donne le vent et qu'on alimente par le haut en combustible.

La partie supérieure du four est une simple maçonnerie en briques qui couvre l'annexion en tôle où pénètre le vent (suivant le croquis ci-dessous).

Les creusets sont en plombagine.



Lorsqu'un four est en marche on le couvre, s'il y a lieu, avec un couvercle en tôle. Les produits de la combustion s'échappent par un trou pratiqué dans la maçonnerie du four dans un rampant général d'où ils passent dans une étuve, et, de là, dans la cheminée de l'usine.

Grues. — Ajoutons, pour être complet, que l'usine possède deux grues roulantes, l'une de 4 mètres de rayon, l'autre de 5 mètres, qui facilitent toutes les manutentions, aussi bien pour la fabrication de l'aluminium que pour le travail de l'atelier de fusion et de moulage.

FABRICATION DE L'ALUMINIUM

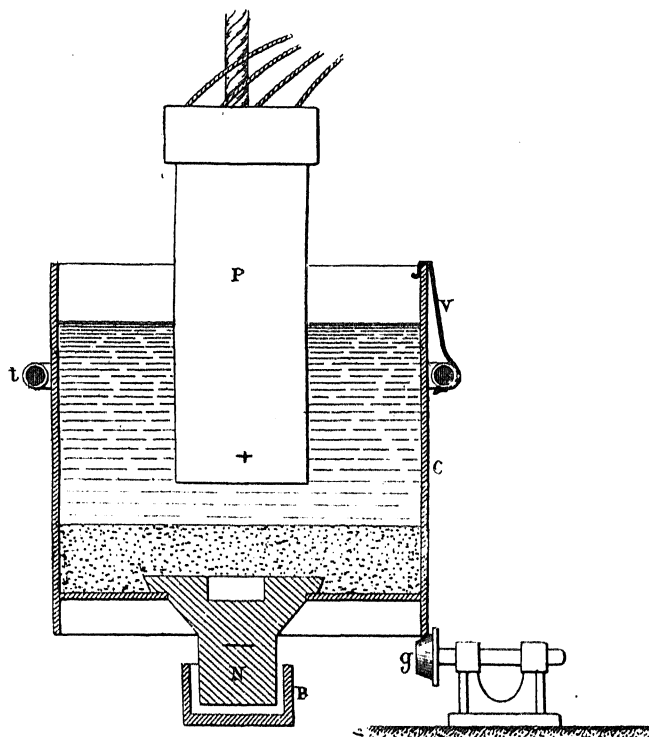
A l'origine, c'est-à-dire du mois d'avril au mois d'octobre 1889, l'usine de Froges n'a fabriqué que du bronze et du ferro-aluminium par le procédé Héroult, que nous avons décrit (brevet de 1887). Depuis, la demande de « ferro » ayant diminué et, au contraire, celle d'aluminium pur ayant augmenté considérablement, l'on a repris l'exploitation du brevet Héroult de 1886, déjà expérimenté à l'usine de Neuhausen.

Actuellement, on a complètement renoncé à la fabrication directe des alliages par l'électrolyse et on ne fait plus que de l'aluminium métallique aussi pur que possible. (Nous donnons plus loin la composition chimique des produits.)

Le plus grand inconvénient lorsqu'on marche en ferro ou en bronze, c'est que l'on obtient des produits de composition extrêmement variables, qui nécessitent ensuite des refontes avec le métal à allier, si l'on tient à obtenir une composition déterminée; en outre, les produits sont moins purs.

On ne fait plus, à Froges, que de l'aluminium pur, et les premiers fours Héroult qu'on avait installés sont remis en magasin.

Four d'aluminium. — Le four d'aluminium se compose d'une cuve cylindrique en tôle de 0m,60 de diamètre et de 0m,55 de hauteur environ (C). Le fond de la cuve est traversé par l'électrode négatif N qui est en cuivre et qui plonge dans une boîte parallélipipédique en fonte F, au fond de laquelle se trouve une couche de 0m,15 de mercure, afin d'établir un bon contact électrique. Le câble conducteur est relié à la boîte en fonte B dans laquelle circule, en outre, un courant d'eau pour empêcher l'élévation de température qui volatiliserait le mercure.



Au-dessus du fond de la cuve on a dammé, avec le plus grand soin, une couche de charbon graphitique mêlé de goudron, comme celui qui est employé à la formation de l'électrode positif : cette couche médiocrement conductrice isole suffisamment les parois du four.

Avant de mettre le four en action, on fait sécher à feu doux la brasque du fond au-dessus d'un des fours soufflés dont il a été question.

Le charbon positif P est formé de lames de charbon aggloméré, fabriquées ainsi qu'il sera dit plus loin et réunies en un bloc. Il est fixé dans une chape d'où partent les câbles conducteurs et on l'élève ou on l'abaisse à l'aide d'une vis dont l'écrou est venu de fonte avec une potence qui soutient le tout. (L'appareil a déjà été représenté et sommairement décrit dans un court article inséré dans *la Nature*, numéro du 25 janvier 1890.)

Autour de la cuve et au tiers supérieur de la hauteur se trouve un tube *t* percé de trous fins, qui est destiné à projeter de l'eau en pluie si la tôle vient à rougir quelque peu. Ce tube est soutenu par des crochets *v*.

La cuve repose, en outre, sur trois galets de roulement *g* qui avaient pour but d'imprimer à la cuve un mouvement de rotation qui avait paru indispensable à la réussite de l'opération; c'est ainsi, du moins, qu'on opérait à l'usine de Neuhausen, qui est, en quelque sorte, la maison mère de Froges. Là on a jugé que le mouvement de rotation ne se justifiait par aucun aperçu théorique, et la pratique a donné raison à cette vue. Aussi les galets ne servent-ils plus que comme supports.

Je dois ajouter que l'article de *la Nature* qui vient d'être mentionné indique que les parois de la cuve sont également brasqués, tandis qu'actuellement la brasque est également abandonnée comme étant inutile.

Fabrication de l'électrode en charbon.

Nous avons dit que le charbon électrolytique était fabriqué à l'usine de Champs, en aval de celle de Froges, et dont les opérateurs sont mus, à l'aide d'une turbine alimentée à l'aide de l'eau du canal de fuite de l'usine supérieure; la chute dont on dispose ainsi est de 13 mètres.

La matière première est du coke de cornues à gaz. La première opération consiste à broyer le coke dans un broyeur à mâchoires; puis on le pulvérise à l'aide d'un couple de meule à axe horizontal. La troisième opération consiste à bluter la poussière du charbon; la « farine » ainsi obtenue passe dans un autre couple de meules analogues aux précédentes.

A l'axe des meules est fixé un réservoir cylindrique contenant du goudron, qui s'écoule peu à peu dans la cuve des meules, où il est malaxé à la fois à l'aide du frottement des meules et des râcloirs, qui opèrent obliquement au rayon de rotation. La pâte ainsi formée contient 30 p. 100 de goudron.

Elle est pilonnée dans un cadre en fonte placé sur une table de même substance. On en fait ainsi une grande brique (à la mode des mottes de tan), laquelle passe dans un laminoir à axes horizontaux qu'elle traverse deux ou trois fois. On l'étend ensuite sur une table et l'on coupe avec un couteau les bavures et on obtient ainsi une planche de charbon ayant environ 0,15 d'épaisseur, $0^{m},25$ de large et 1 mètre de longueur.

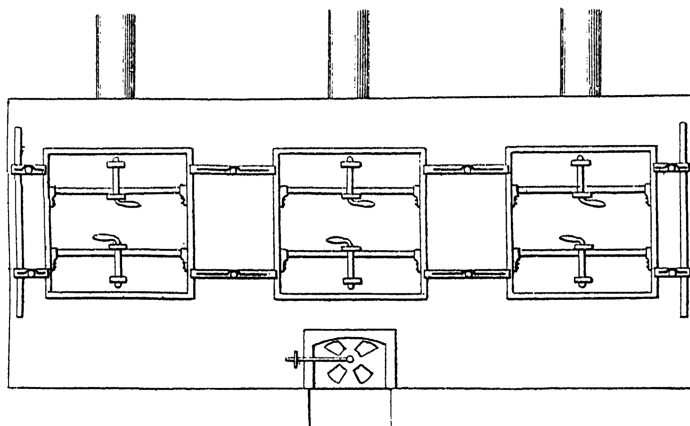
Les planches ainsi obtenues sont séchées à l'air libre pendant deux ou trois jours sur des feuilles de tôle placées sur des rayons dans l'usine. De là, elles passent pendant quatre jours dans une étuve où la température moyenne est de 150 degrés environ.

La figure ci-dessous représente l'élévation de cette étuve : à chaque porte correspond une cheminée en tôle; de telle sorte que la chaleur se répand d'une manière à peu près uniforme.

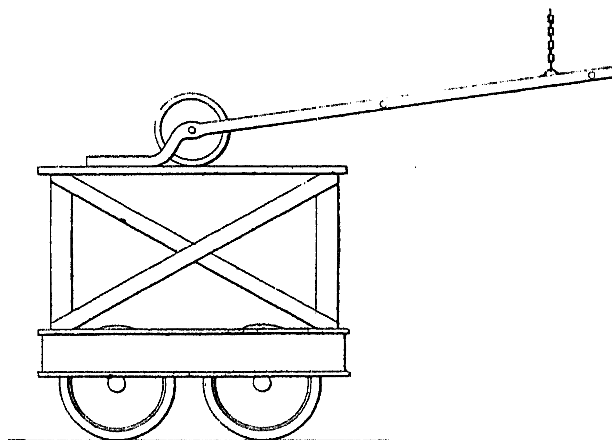
Les portes de l'étuve sont en fer, le reste est en maçonnerie de briques.

Les produits de la combustion pénètrent dans un rampant qui distribue la chaleur dans l'étuve par le moyen de registres répartis sur toute la longueur.

Les lames de charbon séjournent dans cette étuve environ quatre jours, au bout desquels elles sont défournées et passent dans un four à réverbère. Mais, auparavant, on réunit un certain nombre de lames de façon à former un bloc de section carrée.

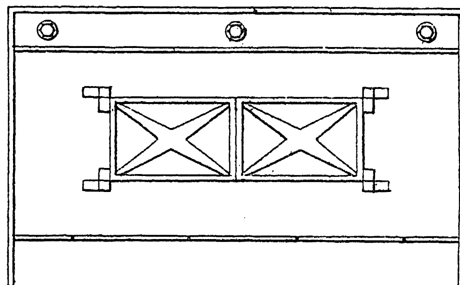


L'adhérence des lames s'obtient par un procédé qui est le secret de l'usine. Le bloc formé est placé dans une auge en fonte et entouré de poussier de charbon. C'est cette auge pleine qui est introduite dans le four à réverbère à l'aide d'un levier coudé suspendu par une chaîne à une poutre du plafond et

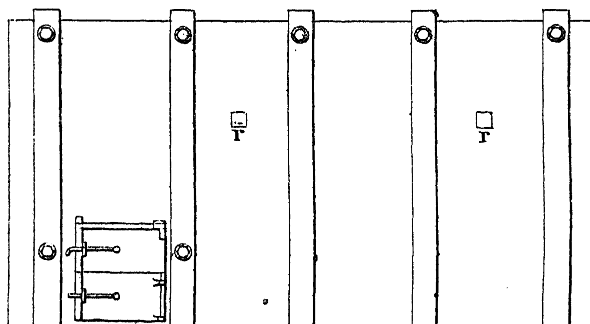


reposant sur un galet qui roule sur un rail porté par un chariot. Le croquis ci-dessous donne un aperçu de cet appareil qui est une sorte de brouette.

Il y a à Froges deux fours accolés et un troisième isolé. Les dessins représentent ce four sur deux de ses faces.



La figure ci-dessus représente la face antérieure : les portes, en fer, sont lutées avec de l'argile; la figure suivante montre la face du foyer.



r sont les regards bouchés par des briques mobiles par où l'on surveille l'état de la flamme. La sole du four est définie par le dessus de la porte de chargement du foyer dans cette dernière figure et le dessous des portes d'enfournement de la figure précédente.

L'opération dure quatre ou cinq jours. Après refroidissement, les charbons forment un bloc dur qu'on scie en deux, de façon à former deux blocs de 0m,50 de longueur chacun. Nous verrons plus loin pourquoi on limite la longueur à 0m,50.

Production de l'Al. métallique. — Pour mettre un four en marche on commence, après avoir placé la cuve sur les galets, par fixer le charbon électrode positif dans la chape qui doit le maintenir et on l'abaisse vers le fond de la cuve, mais en interposant entre les deux un morceau de charbon plat pour permettre au courant de passer. On fait passer le courant, puis on y verse de la cryolithe naturelle par petites additions successives, à mesure que celle qu'on a versé entre en fusion. On ajoute enfin de l'alumine pure en poudre qui est le véritable minerai d'aluminium.

Quand l'opération est en pleine marche, la cuve est remplie jusqu'à 0m,10 environ du bord et on maintient le niveau.

Pendant la marche, les parois de la cuve se recouvrent d'une couche protectrice de cryolithe adhérente dont la cause est, sans doute, le refroidissement de la paroi. La preuve de cette opinion est dans ce fait que, toujours dans les débuts de l'opération, une fois que la masse est en fusion, les parois rougissent légèrement. A ce moment, il suffit de donner le jet circulaire d'eau froide, ainsi qu'il a été dit.

C'est la constatation de ce fait qui a permis de se passer du garnissage intérieur en brasque qui réduisait la capacité de la cuve et était une cause de dépense inutile.

La cryolithe se solidifie aussi à la surface du bain, au point qu'il est nécessaire de casser souvent la croûte avec un ringard en fer. On voit alors le bain bouillonner légèrement autour de l'électrode de charbon dont les débris flottent à la surface et sont écumés de temps en temps avec une cuiller en fer.

Le trou de coulée est bouché avec un tampon de brasque; au bout de vingt-quatre heures on le débouche à l'aide d'une tige pointue en fer et le métal s'écoule dans une lingotière en fonte ; la coulée par cuve est de 20 kilogrammes en moyenne, ainsi que je l'ai constaté en assistant à un grand nombre d'opérations.

Le rendement est, dit-on, de 22 grammes par cheval-heure pour une force électromotrice qu'on dit être de 10 à 15 volts, mais qui, réellement, est de 25 en moyenne.

La production actuelle de l'usine est au maximum de 100 kilogaammes par jour. Mais, pour obtenir une production plus grande, une plus grande quantité de force motrice devient nécessaire.

Il est facile de se rendre compte de l'opération même de la réduction. La cryolithe est électrolysée et l'alumine dissociée dans la cryolithe est réduite en présence du charbon.

Cette théorie est corroborée par deux faits : l'un est que la dépense en alumine répond, à peu près, à la production d'aluminium; l'autre est que les vapeurs et fumées qui, en petite quantité, se dégagent du four, ne contiennent pas d'acide fluorhydrique, ainsi que je l'ai constaté, par l'absence de toute action sur le verre de vitre placé au-dessus pendant un temps prolongé. On conclut de ce dernier fait que la cryolithe n'est pas décomposée, puisque le fluor n'est pas mis en liberté. Ce métalloïde ne se porte pas d'ailleurs, sur la cuve en tôle qui paraît inaltérable, puisqu'au bout de quelques mois de marche aucune d'elles n'a subi d'usure.

On ne trouve nulle part la trace du dégagement du fluor; il est donc permis d'en déduire qu'il est resté incorporé à la cryolithe et que l'alumine seule a été décomposée.

D'autre part, la température relativement faible à l'aide de laquelle on opère ne permet plus de dire, comme dans le procédé Cowles ou le premier procédé Héroult, que c'est la chaleur extraordinaire produite par l'arc électrique, qui dissocie l'alumine.

Enfin, on sait par la connaissance des chaleurs de formation que le charbon seul ne peut être considéré comme le réducteur de l'alumine. On est donc conduit à admettre que l'alumine dissociée dans la cryolithe est elle-même élec-

trolysée et que la combustion du charbon vient en aide à l'électrolyse pour opérer la réduction.

Une preuve indirecte de cette explication provient de l'usure considérable de l'électrode positif et qui est de $1^{kg},6$ par un kilogramme d'aluminium.

Les consommations totales réelles sont de :

$1^{k},600$ de charbon,
2 ,150 alumine,
1 ,800 cryolithe,

et la production moyenne correspondante de 17 grammes par cheval-heure.

Pour réduire l'usure du charbon on l'asperge avec le bain à l'aide d'une cuiller et il se forme ainsi, à la surface, une légère couche protectrice dans la partie qui est exposée à l'air et qui, sans cette précaution, prend feu, principalement à la surface du bain.

On avait employé, au début, des électrodes de 1 mètre de long, dans le dessein de réduire la part proportionnelle de déchet. L'expérience a montré que les lames accolées se séparaient souvent, se brisaient à une certaine hauteur et tombaient ainsi dans le bain. Souvent même le bloc se cassait par une section droite. On a alors réduit la longueur à $0^{m},50$, et l'inconvénient signalé ne s'est plus reproduit, ou, du moins, ne se reproduit que très rarement.

Un électrode est retiré lorsqu'il a diminué de 15 centimètres; il a alors une forme tronconique étant principalement usé du bout; ce remplacement de l'électrode se fait toutes les vingt heures environ.

D'après ces éléments, la consommation de charbon par vingt heures est de $26^{kg},6$.

Il est certain que la consommation de charbon électrique est une grande source de dépenses dans l'application de ce procédé et qu'on ne saurait attacher trop d'importance à sa fabrication économique.

L'alumine est achetée, en Allemagne, $1^{f},40$ le kilogramme et la cryolithe coûte $1^{f},20$ le kilogramme, et même davantage.

Mais il est certain, d'après les renseignements que nous avons donnés sur le procédé de l'*Alliance*, qu'on peut se procurer de la cryolithe du Groënland à moitié prix. Il reste à savoir si on ne parviendra pas à fabriquer de la cryolithe artificielle à bas prix à l'aide de la chaux fluatée naturelle.

Il importe également d'obtenir de l'alumine artificielle à bas prix; car on ne peut employer que très exceptionnellement l'alumine naturelle ou bauxite, toujours souillée d'oxyde de fer et de silice, alors qu'il est de la plus haute importance de produire l'aluminium, en première fusion, à un haut degré de pureté.

A cet égard on peut même se demander s'il n'y aurait pas avantage à traiter le coke pilé aux acides, avant de le malaxer, pour éviter d'introduire quelques impuretés dans le métal.

La cryolithe employée a la composition suivante :

SiO^3	0,35
Fe^2O^3	traces.
Ca	1,20
Mg	0,10
Al	15,40
Na	27,28
Fl	54,10
Perte au feu. .	0,80
	99,23

d'après l'analyse faite au bureau d'essai de l'École supérieure des Mines.

La cryolithe type analysée par Rivot (t. II, p. 387), a la composition suivante :

Al	12,55
Na	33,10
Fl	54,35

L'échantillon de celle employée à Froges est donc moins riche en sodium et plus riche en aluminium, tandis que la quantité de fluor est sensiblement la même.

Nombre d'ouvriers. — Par cuve on emploie un seul ouvrier; il y a en outre un conducteur et pour toute l'usine un contremaître, soit, en tout, avec les mouleurs, vingt-huit individus.

PRODUITS

Aluminium. — L'aluminium coulé du fourneau contient de 97 à 98 p. 100 de métal pur.

Après refonte, la teneur s'élève de 98,5 à 99 p. 100.

Les impuretés sont le fer, la silice, le silicium et, à ce qu'on prétend, un protoxyde de silicium, ce qui ne me paraît pas prouvé.

Les nombreuses analyses que j'ai relevées sur le carnet même du laboratoire de l'usine donnent une moyenne de 0,50 à 0,57 p. 100 de fer.

Le procédé d'analyse employé est le suivant : on dissout de la limaille ou métal coulé dans l'HCl qui attaque vivement. On étend d'eau et on filtre. La matière sur le filtre est brune et cette couleur est attribuée au silicium. On dose à la fois toute la partie insoluble qui est de 0,9 à 1,50 p. 100 pour le métal cru et de 0,70 p. 100 en moyenne pour le métal refondu. Le fer est dosé dans la liqueur par le permanganate de potasse.

La refonte de Al se fait dans des creusets en plombagine plus petits que ceux que nous avons décrits plus haut, que l'on a mis dans un des fours soufflés. La fusion est très rapide. On coule le métal dans une lingotière double, plate, et on a ainsi des plaques pesant $2^{kil},400$ qui sont livrées telles qu'elles au commerce.



J'ai constaté que le métal de première coulée se forge admirablement à froid, qualité précieuse pour la rivure directe.

Je signale en passant la sonorité considérable de ce métal. Une plaque suspendue à une ficelle et frappée avec une barre de fer a vibré d'une façon perceptible à l'oreille pendant 2'50".

Bronze d'aluminium. — Nous avons vu qu'on a employé d'abord la méthode Héroult pour alliages directs : elle avait le désavantage de donner des produits de teneur variable. C'est la raison principale qui l'a faite abandonner.

Nous avons déjà décrit les bronzes à 5 et à 10 p. 100.

Le bronze à 12 p. 100 est à grain très fin, serré comme celui d'une fonte de seconde fusion très fine, d'un éclat un peu gras dans la cassure et d'une couleur jaune très pâle. Ce qu'il y a de curieux, c'est ce changement considérable de teinte du bronze de 10 p. 100 à celui de 12 p. 100, tandis qu'il y a peu de différence entre le 5 p. 100 et le 10 p. 100.

Le bronze à 17,90 p. 100 est cassant; il a un éclat gras et résineux et il contient de nombreuses petites bulles. Sa couleur est presque blanche et très brillante sous la cassure.

Le bronze à 26 p. 100 présente un aspect analogue; mais il est encore plus blanc et d'un éclat moins gras.

L'analyse chimique montre que ces bronzes contiennent de 0,5 à 1,5 p. 100 de matières insolubles, en majeure partie de la silice.

Aujourd'hui, le seul bronze fabriqué à l'usine sur commande est celui à 10 p. 100 en fondant d'abord dans les creusets en plombagine le cuivre à l'état de plaques de cuivre cémenté.

Ce n'est que lorsque le bain est fluide qu'on introduit l'Al. métallique et on opère le mélange en brassant avec une barre en fer; cette opération se fait très rapidement en raison de la fusibilité de l'Al.

Comme l'usine possède un stock important de bronze Héroult, on ajoute souvent au bain des fragments de ce métal, en tenant compte de sa composition; on en fait de même dans la préparation du laiton, dont nous parlerons tout à l'heure.

Le bronze est coulé en sable ou en coquille. Sous cette dernière forme il a une résistance plus grande à la rupture par traction, mais moins d'allongement. Mais, pour donner de bons résultats, on a constaté qu'il est nécessaire que le bronze qui doit être coulé en coquille contienne 1,5 p. 100 de silicium. Au contraire, le bronze coulé en sable pour être bon, doit être très pauvre en silicium.

Dans le procédé Héroult, on introduit directement le silicium dans l'alliage, en ajoutant au bain un peu de silice pure.

J'ai relevé sur les carnets d'expériences les résultats suivants relatifs à la résistance du bronze obtenu dans l'usine :

AL °/o	RÉSISTANCE A LA RUPTURE	ALLONGEMENT	
—	—	—	
10	61,8	10	coulé en coquille.
9	57,5	26	
8,5	51,5	31	
10	69,0	3	

La distance entre les repères était de 200 millimètres.

L'expérience suivante a été faite sous mes yeux :

10	46,3	16,5 (en sable).

Tréfilé à 1 millimètres de section, le bronze à 9 p. 100 résiste à 116 kilogrammes de traction et supporte, avant rupture, 15 pliages sur un mandrin de 0^{m},003. L'allongement au moment de la rupture est de 1,7 p. 100.

Le bronze à 10 p. 100 se forge au rouge avec la même facilité que le fer, et cette propriété, qui le distingue de tous les autres bronzes, lui donne un avantage appréciable dans les applications, puisqu'il a des qualités, comme le peu d'altérabilité dans les acides et l'inaltérabilité à l'air, qui font défaut au fer, qui a, en outre, une résistance beaucoup moindre à la traction.

Les résistances que nous venons de citer sont comparables à celles du bronze Cowles, mais on remarquera, en comparant les tableaux d'expériences, que les allongements avant rupture obtenus à Froges sont plus grands, preuve de la supériorité de la méthode qui consiste à faire l'alliage avec de l'Al. produit directement.

Laiton d'aluminium. — Le laiton d'Al., que l'on produit couramment à Froges, a une teneur de 1 p. 100 d'Al. seulement.

On a bien essayé des laitons à des teneurs supérieures, mais le métal obtenu perd ses qualités à mesure que la proportion d'Al. augmente, et notamment la résistance à la rupture, la malléabilité, etc.

Le laiton à 5 p. 100 notamment, qui est d'un beau jaune grenu et homogène, est cassant comme du verre.

La composition moyenne du laiton qu'on emploie est donc :

Cu	64
Zn	35
Al	1

On voit qu'il diffère du laiton Cowles par une proportion un peu plus grande de Zn (35 au lieu de 33,3) et un peu moindre de cuivre.

Les propriétés de cet alliage sont très remarquables. D'abord il se travaille aussi bien que le bronze, à la raboteuse, au ciseau, à tous les outils enfin.

Tréfilé à 1 millimètre de section, il résiste à 105 et jusqu'à 108 kilogrammes, avec un allongement de 2 p. 100 et supporte 60 à 70 pliages autour d'un mandrin de 0,006. C'est-à-dire que le fil de laiton vaut celui de bronze. Ce métal se forge également dans les conditions du bronze, ce que ne fait pas le laiton sans Al. (à 3 p. 100 Al. il se forge encore; nous avons vu qu'à des teneurs plus élevées il devient cassant).

Quand nous parlerons de laiton par la suite, il ne sera plus question de l'alliage à 1 p. 100.

Expériences de rupture par tractions relevées sur le carnet du laboratoire.

Le laiton était coulé en coquilles et les tiges avaient 200 millimètres entre les repères.

RÉSISTANCE A LA RUPTURE par millimètre carré.	ALLONGEMENT p. 100.
kilogrammes	
41,0	45,0
41,7	48,5
43,8	49,0
44,0	36,0
44,6	45,0
45,0	35,0
45,7	43,0
46,0	41,0

Je ferai remarquer que la composition de ces laitons n'est pas rigoureusement constante, que la proportion de Cu varie entre 64 et 63 p. 100 et celle de Zn entre 35 et 36.

En outre, la mesure des allongements ne se fait pas au cathétomètre, mais simplement au décimètre, en rapprochant les deux fragments provenant de la rupture; de même que la section est mesurée à l'aide d'un compas d'épaisseur à vernier.

Il ne s'agit pas là d'expériences ayant un caractère scientifique, mais seulement industriel. Cette restriction suffit pour faire juger la constance remarquable des résultats obtenus, et qui, sans aucun doute serait encore plus saillante si on entourait les expériences d'une rigueur scientifique; et le laiton d'Al. présente les caractères pratiques d'un métal extrêmement précieux dans les art.

Tout en ayant une résistance à la rupture moindre que le bronze d'Al., il a sur lui l'avantage d'une plus grande souplesse, ayant un allongement avant rupture très considérable. J'en conclus que cet alliage pourrait rendre de très grands services dans la fabrication des chaudières à vapeur, usage dans lequel il aurait des avantages marqués sur le fer et sur l'acier.

La dernière expérience que je relate, à laquelle j'ai moi-même assisté, c'est celle provenant de l'essai d'un moulage de coussinets pour locomotives, commandé par la compagnie des chemins de fer du Midi et qui a donné 47 kilogrammes de résistance à la rupture et 39 p. 100 d'allongement.

Ce laiton provenait d'une cinquième refonte (lorsqu'on coule en sable, on laisse de fortes masselottes qui sont refondues pour d'autres opérations), et n'avait pas été altéré. C'est un avantage qu'il présente en commun avec le bronze à 10 p. 100, qui, lui aussi, ne se liquate pas, comme le fait le bronze à l'étain, et peut ainsi resservir indéfiniment.

Pour faire le laiton, on fond d'abord le cuivre dans un creuset en plombagine. Puis on ajoute le zinc en morceaux moins gros que le poing et on remue

avec un ringard en fer. On voit alors le zinc brûler avec une flamme vert-bleuâtre et des flocons de ZnO voler en l'air.

La fusion est très rapide; il ne reste plus qu'à ajouter l'Al. au dernier moment et à brasser un instant. Puis on retire le creuset du four, on le décrasse et on coule.

Comme il a été dit ci-dessus, on ajoute avant l'addition d'Al. métallique un peu de bronze Héroult pour en diminuer le stock.

On fait aussi, sur commande, des coussinets pour des compagnies de chemins de fer.

Ferro-aluminium. —Le ferro-aluminium, dont l'usine possède une réserve importante, provient du premier procédé Héroult. Le magasin en possède à des teneurs variant de 9 à 30 p. 100.

J'ai relevé sur les carnets d'analyse une teneur en silicium variant entre 1,30 et 1,60 ou 2 p. 100 au maximum dans les débuts; à la fin, on descend à une moyenne de 1 p. 100 et même jusqu'à 0,56 p. 100.

Prix de vente. — Le kilogramme d'Al. se vend, à Froges, 30 francs jusqu'à 100 kilogrammes; de 100 à 500 kilogrammes, 25 francs le kilogramme, et 20 francs au dela de 500 kilogrammes.

Nota. — A Froges on a fabriqué une soudure pour l'aluminium de Zn et Cu On l'a essayé avec du cadmium remplaçant le zinc, et l'on n'a pas réussi.

Alliage Ni, Cd, Al.

On a essayé un alliage ainsi composé :

$$\begin{aligned} Ni &= 2,5 \\ Cd &= 2,5 \\ Al &= 95,0. \end{aligned}$$

Cet alliage est blanc mat et se forge très bien à chaud

USINE DE NEUHAUSEN

Cette usine est établie au pied même de la chute du Rhin, que le public place à tort à Schaffouse, à quelques kilomètres en amont.

C'est là que M. Héroult a fait faire les premières applications de son procédé de réduction de l'alumine par le courant électrique. Quelques temps après, M. Kiliani ayant fait connaître à Berlin un procédé quelque peu différent, les brevets des deux inventeurs furent réunis par la nouvelle société créée en 1888 sous le nom de : *Aluminium-Industrie-Actien Gesellchafft*, au capital de 10 millions, et à laquelle appartient l'usine actuelle de Neuhausen.

Le canton de Schaffouse a accordé à la société (février 1889), le droit d'opérer en amont de la chute du Rhin une prise de 20 mètres cubes par seconde, et

comme la hauteur de la chute est de 20 mètres, c'est une force brute de 5,293 chevaux qui se réduit, en réalité, à 4.800 chevaux environ.

La première installation avait été identique à elle que nous avons décrite pour l'usine de Froges, et d'ailleurs elle a été conservée à Neuhausen, où nous avons pu la voir. Ce n'est que récemment que de nouvelles turbines et nouvelles machines dynamo-électriques plus puissantes ont été installées. Nous ne savons pas, d'ailleurs, si l'ancien atelier doit disparaître ou s'il doit fonctionner concurremment avec le nouveau.

Quoi qu'il en soit, cette installation ne diffère pas seulement de l'ancienne par une puissance plus considérable, mais encore par la disposition des machines, qui sont ici à axe vertical, tandis que les anciennes sont à axe horizontal.

Les machines sont à connexion directe, c'est-à-dire que les arbres des dynamos sont sur le prolongement des arbres des turbines qui sont, par conséquent, des turbines horizontales : ce sont des turbines du type Jonval.

Ces machines sont fournies, comme celle de Froges, par la Société Escher, Wyss et Cie, d'Oerlikon, près Zurich.

Les machines dynamo sont au nombre de trois, deux de 600 chevaux effectifs chacune et la troisième, qui est l'excitatrice, de 300 chevaux. Cette machine, comme l'excitatrice de l'ancien système, sert en même temps pour l'éclairage électrique et actionne l'arbre de couche des machines-outils.

D'une part, la verticalité des axes de rotation permet de réduire au minimum l'emplacement des machines; de l'autre, la connexion directe, supprimant des organes de transmission permet une plus grande vitesse de rotation des turbines et la réduction des diamètres. Ce système d'installation présente, en outre, une foule d'avantages secondaires sur lesquels il est inutile d'insister ici.

On n'utilise, en réalité, que 10 mètres cubes sur les 20 mètres cubes autorisés. L'eau est amenée dans les canaux fixes de la turbine par des tuyaux en tôle de fer calculés pour une vitesse d'écoulement de 2 mètres à la seconde; de sorte que le diamètre intérieur des tuyaux est de 2^{m},5.

La perte de charge par le frottement est évaluée à 0^{m},18.

Les tôles des tuyaux ont une épaisseur de 8 à 10 millimètres, ce qui me paraît exagéré pour la pression qu'elles ont à supporter.

Les turbines de 600 chevaux sont construites pour un débit maximum de 3.150 litres.

Leur vitesse de rotation a été calculée pour 225 tours par minute, d'où un diamètre moyen de la turbine fixé à 1^{m},100.

Les canaux fixes et mobiles ont des ouvertures de 250 millimètres de large et une section moyenne de 192 millimètres.

On a naturellement établi un isolement entre les deux axes, en prolongement de chaque turbine et de la machine dynamo.

Le point délicat de cette installation était le pivot qu'on ne pouvait faire reposer sur une crapaudine ordinaire à cause de l'énormité du poids à supporter.

C'est pourquoi on a prolongé l'arbre de la turbine par un piston qui se meut dans un cylindre qui communique par un conduit étroit avec l'aspiration. Ce tuyau porte une soupape à gorge dont l'ouverture variable permet d'exercer une

pression également variable sur le piston et de soulager d'autant la charge qu'il supporte.

La turbine de 300 chevaux a reçu une installation analogue; elle fait 350 tours à la minute. Le diamètre moyen est de 700 millimètres et la couronne ainsi que la partie mobile ont chacune 12 ouvertures.

La conduite maîtresse est munie d'un robinet-valve modérateur en fonte et il en existe un analogue à la jonction des conduites spéciales avec la chambre de la turbine.

Pour obvier au danger qui résulterait d'un arrêt subit et instantané de l'opération de fusion électrique, alors que les turbines prendraient une vitesse que les régulateurs centrifuges seraient impuissants à modérer, on a installé sur un tuyau de décharge un petit servo-moteur hydraulique qui peut se fermer presque instantanément dès que le régulateur qui y est adjoint dépasse un certain nombre de tours fixé d'avance. Alors la contre-pression atteint rapidement la pression motrice et la rotation s'éteint spontanément.

Les machines dynamo sont prévues pour 6 à 7.000 ampères chacune; mais accidentellement elles ont marché à 15.000 sans avoir subi de dommage. Il est vraisemblable qu'il n'existe pas ailleurs de machines dynamo de cette puissance.

Le champ magnétique des grandes machines comprend 24 pôles.

Le corps de l'inducteur est une roue en fonte, coulée d'une seule pièce, qui a l'aspect d'une roue dentée intérieurement à 24 dents. Le diamètre de la roue est de 3m,60 et le poids total de 2 tonnes. Le diamètre intérieur est de 2m,430.

L'induit, du type à tambour, système C. E. L. Brown présente quelques particularités remarquables dont la description concerne les ouvrages spéciaux. Il nous suffit de signaler les facilités de réparations qu'elle offre isolément pour chaque spire et lamelle conductrice sans nécessité de mettre en cause tout l'appareil pour un accident arrivé à une partie.

L'armature comporte 240 fils correspondant à 120 lamelles en relation avec le collecteur. Le courant est conduit par 24 groupes de balais de 5 chacun, soit 120 balais. Chaque groupe de 12 balais correspond à un anneau massif en cuivre d'où le courant est conduit au lieu de consommation de l'électricité. Chacun des anneaux en cuivre pèse 3.000 kilogrammes.

Ces immenses pièces ont été coulées à Neuhausen, et on n'a pu y réussir qu'avec une petite addition d'aluminium qui réduisait l'oxydule du cuivre au moment de sa formation à la haute température de la coulée.

Nous avons dit que les grandes machines travaillent à 6 ou 7.000 ampères chacune; elles sont accouplées en tension et la différence de potentiel est de 30 volts. La marche régulière est de 150 à 200 tours par minute.

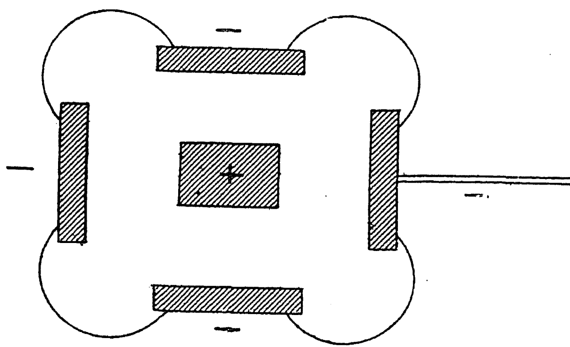
La machine de 300 chevaux possède 160 spires et 80 lamelles, le courant est pris sur le collecteur par 8 groupes de 4 balais. La vitesse est de 300 tours et le courant est de 3.000 ampères et 65 volts. La puissance de cette machine peut être forcée de même que celle des précédentes.

Si l'on ajoute à ces 3 machines l'ancienne machine horizontale de 3 à 400 chevaux, on arrive à un total de près d'un million de watts qu'on peut porter, au besoin, à un million et demi.

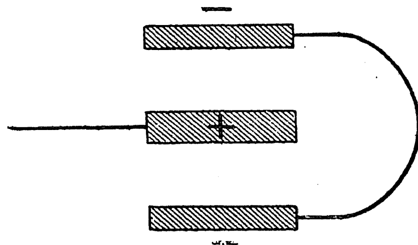
USINE BERNARD, A CREIL

La dernière fois que j'ai visité cette usine, on avait deux dispositions des ctrodes :

1° 4 anodes et 1 cathode au centre, suivant la disposition schématique lessous;



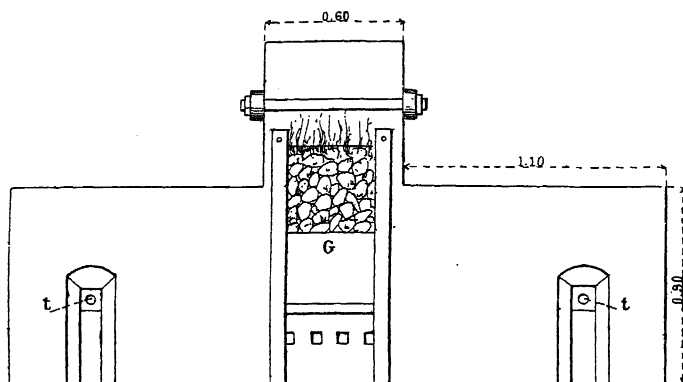
2° 2 anodes



Le courant était, pour 4 cuves, de 1.170 ampères et de 20 à 24 volts. Il était oduit par 3 machines Edison.

On a remarqué qu'avec les 4 cathodes les charbons s'usent moins qu'avec utre disposition.

Disposition du four pour deux cuves.



G Gueulard. — *g* Grille. — *t* Trous de coulée pour le ferro-aluminium.

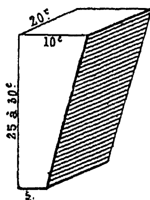
Le four est à flamme renversée; les produits de la combustion passent dans un carneau placé sous le sol et qui communique à la cheminée où aboutissent également les carneaux des fours de fusion de la fonderie.

On peut se demander si ce réchauffement des cuves est bien nécessaire, le courant étant capable de produire une température suffisamment élevée, ainsi qu'il est prouvé dans l'emploi du procédé Kiliani, qui ne diffère pas beaucoup du procédé Bernard-Minet. J'ai cru comprendre que la chaleur ainsi produite doit compenser la perte de température résultant de l'emploi de la dérivation. Aussi, peut-on se demander si la dérivation est réellement nécessaire : j'avoue que j'en doute.

Il faut ajouter que pour conserver la température, le dessus des cuves qui affleure exactement à la surface supérieure la maçonnerie du fourneau est couvert avec des briques plates, mobiles, et, de la sorte, il y a réverbération et le bain ne fait pas croûte à la surface comme à Froges.

Fabrication des charbons électrodes. — On malaxe du charbon pulvérisé avec du brai et de l'alumine dans un malaxeur à ciment, puis on le cylindre, et enfin, on le passe dans un moule à la presse hydraulique. Le moule a une largeur triple d'un électrode et on divise le charbon comprimé à l'aide d'une lame tranchante; ce procédé est plus économique que si le moule n'avait que la dimension exacte d'un électrode.

Le prisme de charbon est représenté en perspective par la figure ci-dessous :

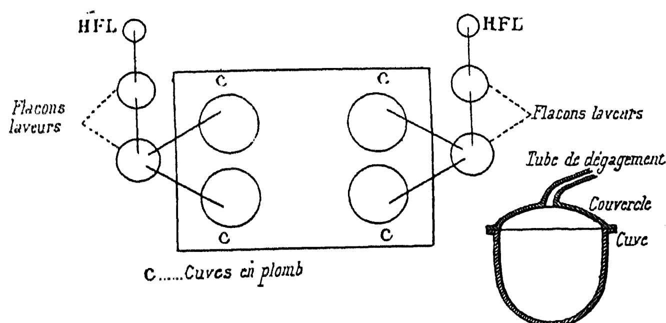


C'est, comme l'on voit, un prisme tronqué.

Les charbons ainsi obtenus sont cuits pendant trois ou quatre jours, empilés dans des fours qui ont servi primitivement à recuire du fil d'acier.

Les électrodes durent douze à vingt-quatre heures; au bout de ce temps, ils sont fort peu usés mais quelquefois cassés. On prétend, en tous cas, qu'on a avantage à les remplacer au bout de ce temps; ensuite, on les broie à nouveau pour servir à la fabrication courante des électrodes. On a tenté l'emploi de graphite naturel ou de charbon de cornue : on y a renoncé à cause de la silice qu'ils contiennent et qui entre dans l'aluminium. Nous croyons que cette exclusion n'est pas motivée en ce qui concerne le charbon de cornues au coke, puisqu'il est couramment employé à Froges et à Neuhausen.

Fabrication de l'acide fluorhydrique. — On traite de la fluorine par l'acide sulfurique, procédé connu, dans des cuves cylindriques terminées par une calotte sphérique en plomb. On réunit quatre cuves dans un même fourneau en maçonnerie; elles communiquent deux à deux à une série de flacons laveurs suivant la disposition schématique de la figure ci-dessous :



La cuve est soigneusement lutée pour éviter les émanations dangereuses d'acide fluorhydrique.

USINE DE WALSEND-ON-TYNE

J'ai visité cette usine en compagnie de M. Netto, l'inventeur du procédé de la société l' « Alliance », qui possède l'usine. Je n'ai pu malheureusement assister à la fabrication, qui est arrêtée depuis quelque temps. Je suppose que la raison de ce chômage est la baisse récente du prix de l'usine de Froges et de celle de Neuhausen. Ces procédés chimiques ne peuvent lutter avec les procédés électriques, dans les conditions actuelles.

Les appareils sont tels que je les ai décrits précédemment, et je n'ai à signaler qu'une seule modification dans la fabrication introduite dans les derniers mois. Elle consiste à faire la réduction de la cryolithe en deux opérations.

Lorsqu'on a introduit le bloc de sodium dans la cryolithe fondue, on le retire presque aussitôt. La première partie d'aluminium réduit a pris la plus grande partie des impuretés (fer et silice). On coule la cryolithe dans un creuset à côté, préalablement chauffé, et on recommence l'opération avec le sodium. On obtient ainsi la plus grande partie de l'aluminium à une teneur de 97 à 98 p. 100 et même 98,5. Lorsqu'on procède à une seule opération, on n'a que de l'aluminium à 95 p. 100, qu'on purifie ensuite par refonte.

Ce système de double réduction est évidemment plus rapide et donne de l'aluminium plus pur, mais je pense qu'il est plus coûteux en raison de la dépense plus grande de sodium.

Le résidu de la fabrication sert à régénérer de la soude dans une usine voisine, et ce produit vient ainsi en déduction des frais de fabrication d'Al. On essaie, en outre, de régénérer la cryolithe à l'aide de ce résidu, et la réussite de cette opération serait plus avantageuse encore.

On a fait, tout récemment, dans cette usine, des essais intéressants de réduction directe de la cryolithe dans un cubilot où l'on fond de la fonte. On a ainsi un ferro-aluminium produit à peu de frais. L'expérience n'a encore été faite qu'en petit et il faut attendre des essais nouveaux, notamment, des essais au convertisseur, que se propose de faire M. Netto avant de se prononcer.

Quoiqu'il en soit, les essais faits en petit ont réussi et sont très encourageants. En mettant une quantité de cryolithe contenant en Al. 3 p. 100 du poids du fer, on obtient un ferro à 1 p. 100. Le métal obtenu est à la fois très dur et très résistant.

USINE DE MILTON

Les renseignements qui ont été fournis par les différentes publications que nous avons citées ne sont pas tout à fait exacts.

Actuellement, il n'y a à Milton qu'une seule machine électrique de M. Crompton.

Cette machine donne au début 3.000 ampères, puis, en pleine marche, de 5 à 6.000 avec 50 à 60 volts.

Dans la communication faite par M. Tohn H. S. Dagger à l'Association britannique pour l'avancement des sciences à Newcastle, le 13 septembre 1889, il est dit que cette machine est probablement la plus forte du monde.

Les machines de Neuhausen démentent cette assertion.

Les chaudières sont du type Babcok-Wilcox, de la force de 600 chvaux et chargées mécaniquement, de sorte qu'un homme suffit pour les conduire.

La machine motrice est horizontale, compound, de MM. Pollet et Wigzelle, de Scowerby-Bridge. Elle possède un régulateur centrifuge qui la maintient à 76 tours par minute.

L'auteur que nous avons cité dit qu'il y a deux ateliers de fusion, l'un pour bronze d'Al. et l'autre pour le ferro, contenant chacun 6 fourneaux.

Nous n'avons vu qu'un atelier à 4 fourneaux conjugués deux à deux et, dans le second, un double four en construction. On m'a dit qu'on doit y construire 6 fourneaux.

Les fourneaux sont quadrangulaires, construits en briques réfractaires et leurs dimensions intérieures sont de $1^m,52$, $0^m,50$, $0^m,92$.

L'extrémité de chaque fourneau est traversée par un tube en fonte par où les charbons électrodes pénètrent dans le fourneau.

Chaque électrode consiste en un paquet de 9 charbons, chacun de 0,058 de diamètre réunis par une chape. Le poids de l'un deux est de 10 kilogrammes. En dernier lieu, on a placé des charbons de 18 kilogrammes par paquets de cinq. Dans ce cas, le diamètre est de 0,075.

Une vis permet d'enfoncer les charbons dans les fourneaux à mesure qu'ils s'usent.

La première opération consiste à faire le revêtement du fourneau en couvrant la sole d'une couche préparée de charbon de bois de chêne. Ce charbon a été broyé sous des meules, mélangé avec un lait de chaux et séché dans un tambour mobile formant étuve à vapeur; il achève de sécher sur une plaque chaude en tôle. Chaque particule de charbon est ainsi entourée d'une pellicule isolante de chaux.

Le charbon de bois est ensuite tassé entre l'enveloppe en fer qui forme l'intérieur du fourneau et la maçonnerie. Ceci fait, la charge de minerai mélangé avec du charbon de bois en fragments et le métal à allier sous forme de tournure ou de granules est mise dans la boîte en fer.

La charge est ensuite couverte avec du charbon de bois en fragments et on met en place un couvercle en fonte que l'on lute pour empêcher l'accès de l'air. Ce couvercle est traversé par un trou pour le dégagement des gaz.

La durée d'une opération est de une heure et demie environ.

Les gaz qui s'échappent s'enflamment au contact de l'air; ils consistent en oxyde de carbone avec un peu d'hydrogène carburé et d'azote.

On attend le refroidissement du fourneau pour retirer l'alliage qui est au fond. On a modifié, heureusement, cette disposition en pratiquant un trou de coulée pour l'alliage.

La force nécessaire est variable suivant la composition de l'alliage à produire; elle est en moyenne de 18 chevaux par heure et par livre d'Al., ce qui est à peu près le rendement du procédé Héroult.

Le métal cru qui provient de l'opération est raffiné, refondu et mélangé avec la quantité de métal nécessaire pour donner à l'alliage une composition fixée d'avance.

Personne n'a encore donné une explication rigoureuse des phénomènes de l'opération, pas plus de ce procédé que des autres. Les uns soutiennent que c'est la chaleur de l'arc qui produit la réduction du minerai en présence du charbon, les autres que c'est l'action électrolytique. Ce qui est probable, c'est que dans ce système comme dans tous les autres, c'est la chaleur du courant combinée à la chaleur de combustion du C qui produit la réduction de l'alumine.

Nous avons exposé les arguments produits de part et d'autre à la Cour de

Berlin, devant laquelle MM. Cowles frères avaient attaqué M. Héroult en contrefaçon : nous ne reviendrons pas sur cette discussion.

Le charbon de bois qui a été converti partiellement en graphite est rebroyé et mélangé avec un lait de chaux et on recommence l'opération.

Le métal coulé est refondu avec de la fluorine et coulé en lingots. Enfin, la scorie est rebroyée et lavée pour en dégager les parcelles d'alliage qui sont restées mêlées au charbon.

USINE D'OLDHAM (près Birmingham).

J'ai tenté de visiter cette usine et, malgré tous mes efforts, je n'ai pu y pénétrer. Il m'a été dit que la fabrication, telle que je l'ai décrite, a été suspendue, et que depuis les nouveaux essais qu'on y fait, l'entrée en est interdite à tout le monde. Il résulte en tous cas des renseignements que j'ai recueillis, que cette usine a dû suspendre sa fabrication en raison de l'élévation du prix de revient de l'Al. eu égard au cours actuel de ce métal.

CONCLUSION

La production de l'aluminium et celle de ses alliages à bon marché constitue, et surtout constituera — à mesure que le prix du kilogramme de métal ira en diminuant — un fait de la plus haute importance et réalisera une des plus grandes révolutions métallurgiques de ce siècle.

Nous avons indiqué les usages nombreux auxquels l'Al. pur est susceptible de se prêter; mais il y en a certainement un grand nombre que nous avons omis, et il y en a beaucoup d'autres qui ne se révèleront qu'à mesure que ce métal sera plus connu et que l'industrie le fournira en plus grande quantité.

Les deux qualités dominantes de l'aluminium sont son inoxydabilité et sa légèreté spécifique.

Par son inoxydabilité, jointe à sa couleur argentée susceptible d'un beau poli, il se rapproche des métaux précieux tout en ayant sur eux l'avantage de la légèreté. Par son prix il se rapproche des métaux communs.

Il a, en outre, l'avantage de se travailler facilement et, notamment, de se laisser forger même à froid et d'offrir, alors, une résistance qui s'approche de celle du fer.

Mais, quelles que soient les qualités de l'aluminium qui lui a surent un large emploi dans les usages domestiques et spécialement pour les objets d'art, c'est surtout par les qualités remarquables de ses alliages qu'il est destiné à un avenir brillant dans la métallurgie et dans les arts de la construction.

Nous rappellerons, pour mémoire, que l'aluminium, est déjà considéré comme le plus grand purificateur des métaux, dont il réduit les oxydes qui préexistent ou qui se forment au moment de la fusion. Il permet ainsi de fondre avec une facilité jusqu'ici inconnue, de grandes masses de fonte, de fer, d'acier et de cuivre, en améliorant considérablement les propriétés élastiques de ces métaux : nous avons donné de nombreux exemples de cette précieuse qualité.

Mais, les alliages avec le cuivre, dont les propriétés sont si remarquables, nécessiteront des masses d'aluminium bien plus considérables, et c'est dans leur fabrication que réside surtout l'intérêt considérable de la production de l'aluminium à bon marché.

Les bronzes et les laitons sont non seulement susceptibles d'être laminés et

tréfilés, mais encore forgés. Leur élasticité est très considérable. En particulier, le laiton d'aluminium qui est le laiton ordinaire additionné de 1 à 2 p. 100 d'Al. seulement, s'allonge de 60 à 70 p. 100 avant rupture. On en déduit que dans la construction d'appareils faits en cette matière, on peut se contenter d'un coefficient de sécurité assez faible et, par conséquent, en diminuer les dimensions et le poids : d'où une grande économie. De plus, le laiton comme le bronze d'aluminium sont peu oxydables et, par conséquent, dans toutes les industries où on emploie des liqueurs acides, ils remplaceront avantageusement les métaux de même résistance élastique.

Cette propriété leur réserve un vaste théâtre d'application dans la marine.

Enfin, nous avons insisté sur l'avantage considérable qu'il y aurait à faire les bouches à feu en bronze d'aluminium. Elles seraient, en effet, plus légères que celles en bronze ordinaire et même en acier, moins oxydables que celles-ci et moins coûteuses. De plus, elles pourront être indéfiniment refondues sans avoir perdu d'autre valeur que la main-d'œuvre et le combustible nécessaire à la transformation.

En ce qui concerne la fabrication de l'Al., nous avons vu qu'il y a actuellement deux grandes méthodes qui luttent de vitesse pour arriver à l'abaissement du prix, l'une chimique, l'autre électro-dynamique. Actuellement, cette dernière paraît déjà l'emporter, car les usines qui produisent l'aluminium chimiquement ont dû s'arrêter, pour la plupart, pour se transformer en vue d'une production plus économique.

Il y a deux questions que ces usines sont tenues de résoudre sous peine de mort : d'abord la production du sodium à bas prix, d'autre part l'utilisation de plus en plus complète des résidus, notamment pour la fabrication de la cryolithe artificielle.

Il nous paraît cependant difficile que la méthode chimique, si compliquée, qui exige tant de combustible et un si grand nombre de transformations de matière première puisse arriver à lutter avec sa jeune rivale, la méthode électro-dynamique.

Quant à celle-ci, son emploi sera d'autant plus économique qu'on aura le combustible ou la force hydraulique à meilleur compte. Les usines électro-dynamiques d'aluminium seront donc placées à côté d'une houillère ou au pied d'une puissante chute d'eau.

Il est prouvé maintenant que le prix de revient de l'Al. s'abaisse à mesure qu'on emploie un courant d'intensité plus grande, et les progrès récents de la fabrication des machines dynamo permettent l'emploi de courants d'intensité énorme.

Dans ces conditions, il me paraît probable que les procédés chimiques succomberont devant les procédés électriques qui, en plus, permettent de réduire la main-d'œuvre au minimum.

J'insisterai, de plus, sur l'argument suivant qui milite certainement en faveur de l'extension de la méthode électro-dynamique en métallurgie; c'est que cette méthode permet de concentrer en un espace minimum un flux de chaleur énorme par unité de temps. Il permet donc de faire abstraction des pertes par conductibilité et rayonnement ainsi que celles dues à l'échauffement

de masses énormes de maçonneries, et dont l'ensemble forme un total considérable dans toutes les opérations de la métallurgie.

J'ai donc la conviction que, peu à peu, le traitement des métaux par l'électricité remplacera de plus en plus les méthodes actuelles où la chaleur est fournie par du combustible plus ou moins impur mêlé au minerai, aux gangues et aux fondants, et dont la masse absorbe inutilement d'énormes quantités de chaleur jusqu'au moment de la fusion.

Je ne crois pas que, dans l'état actuel de la métallurgie de l'aluminium, on puisse faire un choix définitif entre les différentes méthodes électriques en application. D'ailleurs elles ont toutes certains points de ressemblance. En outre, toutes les usines sont de création toute récente et sont à peine sorties de la période des tâtonnements, au point qu'il n'est pas même encore possible d'établir un prix courant constant.

Le procédé Cowles d'abord, et le procédé Héroult ensuite, n'ont pas donné, — ainsi que nous l'avons vu, — de l'Al. pur; mais ils se prêtent fort bien à la fabrication de grandes quantités de ferro-aluminium et de bronze. Il est vrai qu'on n'obtient pas des alliages à teneur constante; mais il suffit de les analyser pour connaître leur teneur exacte et ensuite introduire dans l'alliage définitif la proportion d'aluminium voulue.

C'est ainsi que les usines ont commencé par réunir d'importants stocks de ferro et de bronze. Mais, depuis que l'on a produit l'Al. pur également par l'électricité et en grande quantité, les alliages ont perdu la faveur des métallurgistes. Et, en effet, la production du ferro et du bronze introduit toujours une certaine quantité d'impuretés, de silicium notamment, dont il est ensuite difficile de se débarrasser.

Or, comme on produit aujourd'hui de l'Al. très pur (jusqu'à 99 et même 99,5 p. 100), on est certain d'éviter les impuretés dans le produit final et d'avoir, en fin de compte, un métal possédant des propriétés mécaniques d'ordre supérieur qu'on n'était pas certain d'obtenir par l'autre méthode.

Il en est de même pour le laiton.

Ce qu'il y a de préférable, en somme, c'est que le fabricant d'acier, le fondeur de bronze ou de laiton achètent de l'Al. aussi pur que possible pour faire leurs alliages avec des métaux d'un degré de pureté qu'ils connaissent. Ils sont ainsi en mesure de fabriquer des produits de composition constante, condition qui est de la plus haute importance en métallurgie.

Nous en concluons que les procédés Cowles et Héroult, après avoir inauguré la méthode électrique de production des alliages d'aluminium, disparaîtront probablement devant les procédés tout récents de fabrication de l'aluminium pur.

Nous avons vu que des chimistes de Londres, les frères Brin, ont tenté la fabrication de l'aluminium, ou, du moins, des alliages d'aluminium avec de l'argile. Jusqu'ici il n'est encore question que d'expériences de laboratoire; mais on peut dire que, du jour où cette méthode pourra recevoir une application véritablement industrielle, elle aura un avantage énorme sur les autres méthodes, et que le kilogramme d'aluminium tombera à un prix très bas.

Actuellement on peut déjà obtenir le kilogramme de métal pur à 20 francs

et même à 15 francs, et il n'est pas impossible qu'avant un an ou deux ce prix tombe à 10 francs et peut-être plus bas. Nous sommes donc au début d'une période où les alliages d'aluminium se vendront à un prix tellement modéré qu'ils remplaceront rapidement une foule d'autres métaux sur lesquels ils ont la supériorité des propriétés mécaniques et chimiques dans le détail desquelles nous sommes entré.

L'aluminium est donc le métal de l'avenir, et cet avenir promet d'être très brillant.

FIN

TABLE DES MATIÈRES

PARIS. — IMP. — C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.